

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

Aplikace metody ESPI u vybraných inženýrských  
úloh

Application of ESPI Method for Selected Engineering  
Tasks

Student:

Bc. Jiří Zlámal

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra pružnosti a pevnosti

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Zlámal**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika  
Téma: Aplikace metody ESPI u vybraných inženýrských úloh  
Application of ESPI Method for Selected Engineering Tasks

Zásady pro vypracování:

- 1) Popis principu a aplikace metody ESPI
- 2) Návrh srovnávacího měření (verifikace odporovou tenzometrií)
- 3) Realizace měření na trhačím stroji TESTOMETRIC 500-50CT
- 4) Modelování provedené zkoušky pomocí MKP
- 5) Vyhodnocení vhodnosti metody pro vybrané aplikace

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] TREBUŇA F., ŠIMČÁK F. Příručka experimentální mechaniky. Edice vědecké a odborné literatury, 1528 stran, Technická univerzita v Košiciach, Košice, 2008.
- [2] ANSYS® Academic Teaching Advanced, Release 14.0, Help System ANSYS, Inc.
- [3] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- [4] Dokumentace k přístroji Dantec Dynamics Q100, Dantec Dynamics a Nova Instruments company, 2012. [<http://www.dantecdynamics.com/>]

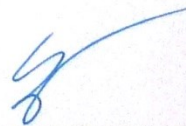
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012  
Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

***Prohlášení studenta:***

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20.5.2013



.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35-užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60-školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská. Technická univerzita Ostrava, (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce budou zveřejněny v informačním systému VŠB- TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo-diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takové případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2013



.....  
Podpis

*Jiří Zlámal*

*Plačkov 550/8, HOLEŠOV 769 01*



## ANNOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ZLÁMAL, J, Aplikace metody ESPI u vybraných inženýrských úloh: diplomová práce, Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti, 2013, 69s. Vedoucí práce: Halama, R.

Zadaná diplomová práce se zabývá problematikou Electronic speckle pattern interferometry(ESPI), s následnou kontrolou a ověření správnosti metody pomocí metody konečných prvků. V úvodní teoretické části práce je popsána metoda ESPI s návazností na holografickou metodu a dále stručně popsány použité měřicí přístroje.

V úvodu navazující praktické části jsou popsána provedená měření na geometricky jednoduchých vzorcích namáhaných tahem a ohybem. Provedení výše těchto úloh si kladlo za cíl vyhodnocení přesnosti a použitelnosti metody, na základě měření pole posuvů, poměrných deformací a napětí. Výsledky z každého měření byly konfrontovány s analytickým či numerickým řešením (analýzy metody konečných prvků). V následující fázi byly poznatky z předešlých měření aplikovány na reálné součásti, přesněji rameno zkušebního stroje a příčný nosník u průmyslové pračky.

**Klíčová slova:** ESPI; optické metody; měření

## ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

ZLÁMAL, J, Application of ESPI Method for Selected Engineering Tasks: Diploma Thesis, Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics of Materials, 2013, 69p, Thesis Head: Halama, R.

Specified Thesis deals with Electronic speckle pattern interferometry (ESPI), with subsequent accuracy verification of the method using Finite Element Method. In the introductory theoretic part describes the method of ESPI in connection with holographic method and used measuring instruments briefly are described.

In the introduction, the following practical section describes the measurements on geometrically simple samples loaded in tension and bending. Performing the task's goal was to evaluate the accuracy and applicability of the method, based on field measurements of displacements, strains and stresses. The results of each measurement were compared with the analytical or numerical solution. In the next stage, the findings of the previous measurements were applied to the real parts, more precisely to the arm of testing machine and transverse beam of industrial washing machine.

**Keywords:** ESPI; optical methods; measurment

## Obsah

Seznam použitých symbolů.....	9
1. Úvod.....	11
1.1. Historie holografie .....	11
1.2. Základní rovnice holografie.....	13
2. Principu a aplikace metody ESPI.....	14
2.1. Úvod ESPI .....	14
2.2. ESPI – Princip systému Q-100 .....	15
2.3. Problematika absolutní fáze.....	17
2.4. Popis měřicího systému Q-100 .....	19
2.4.1. Konstrukční řešení Q-100.....	19
2.4.2. Základní informace o měření.....	19
2.4.3. Princip měření .....	19
2.4.4. Aplikace systému Q-100 .....	20
3. Popis trhacího stroje Testometric M500-50CT.....	22
4. Zpracování jednoduchých technických úloh.....	24
4.1. Demonstrující úloha 1 – namáhání tahem .....	24
4.1.1. Vyhodnocení demonstrační úlohy .....	31
4.1.2. Srovnání s analýzou MKP .....	37
4.2. Úloha 2 - namáhání ohybem .....	42
4.2.1. Vyhodnocení výsledných hodnot .....	44
4.2.2. Srovnání s analýzou MKP .....	46
4.2.3. Analytické řešení .....	48
5. Aplikace metody ESPI v praxi .....	49
5.1. Ověření zkušebního stroje .....	49
5.1.1. Seznámení s úlohou .....	49
5.1.2. Průběh analýzy .....	52
5.1.3. Vyhodnocení analýzy .....	53

5.2.	Analýza naklápečího nosníku průmyslové pračky .....	56
5.2.1.	Seznámení s úlohou .....	56
5.2.2.	Základní technické parametry .....	56
5.2.3.	Problematika úlohy .....	57
5.2.4.	Průběh analýzy .....	60
5.2.5.	Vyhodnocení analýzy .....	63
6.	Závěr .....	66
7.	Poděkování .....	68
8.	Seznam použité literatury .....	69

## Seznam použitých symbolů

$A_f$	Amplituda referenční vlny	[m]
$A_0$	Amplituda objektové vlny	[m]
$B$	Šířka nosníku	[m]
$b_0$	Koeficient charakterizující propustnost	[-]
$b_1$	Koeficient charakterizující propustnost	[-]
$b_{oo}$	Šířka vzorku	[m]
$E$	Youngův modul (modul pružnosti v tahu)	[MPa]
$E_f$	Komplexní amplituda referenční vlny	[m]
$E_0$	Komplexní amplituda objektové vlny	[m]
$e$	Eulerovo číslo	[-]
$E_k$	Rekonstrukční vlna	[m]
$E_r$	Šíření světelného pole za záznamem	[m]
$E_f^*$	Komplexně sdružená amplituda k amplitudě $E_f$	[m]
$E_0^*$	Komplexně sdružená amplituda k amplitudě $E_0$	[m]
$b, h$	Vnitřní rozměry nosníku	[m]
$F_o$	Zatěžující síla při ohybovém namáhání	[N]
$H$	Výška nosníku	[m]
$h_o$	Výška vzorku	[m]
$I$	Jednotková matice	[-]
$I$	Intenzita paprsků	[lx]
$l_o$	Délka ramene působící síly	[m]
$L_N$	Délka nosníku	[m]
$L_j$	Vektor posunutí	[m]
$L$	Vektor posunutí	[m]
$n$	Neznámý fázový sklon	[°]
$M_o$	Ohybový moment	[MPa]
$N$	Fázový posun pro každé měření	[m]
$Re$	Mez kluzu	[MPa]
$R_N$	Reakce zatěžujícího nosníku	[N]
$s$	Citlivost	[ISO]
$S$	Matice skládající se z vektorů citlivosti $s(x, y)$	[-]
$S_j$	sub-matice skládající se ze čtyř řádků a tří sloupců	[-]

$T$	Amplitudová propustnost hologramu	$[-]$
$t$	Čas expozice hologramu	$[s]$
$u,v,w$	Složky posunutí ve směrech $x,y,z$	$[m]$
$W_0$	Modul průřezu v ohybu	$[m^3]$
$(x,y)$	Rovinné souřadnice	$[m]$
$\alpha$	Osvětlovací úhel	$[^\circ]$
$\gamma_{xy}$	Střihové poměrné deformace	$[-]$
$\sigma_N$	Normálové napětí	$[MPa]$
$\sigma_{RED}$	Redukované napětí	$[MPa]$
$\sigma_t$	Tangenciální napětí	$[MPa]$
$\varepsilon_x$	Poměrné deformace ve směru $x$	$[-]$
$\varepsilon_y$	Poměrné deformace ve směru $y$	$[-]$
$\varepsilon_{xb}$	Tenzor deformace	$[-]$
$\varepsilon_{yb}$	Tenzor deformace	$[-]$
$\varepsilon_{xb}$	Tenzor deformace	$[-]$
$\varphi_0$	Fáze objektové vlny	$[^\circ]$
$\varphi_f$	Fáze referenční vlny	$[^\circ]$
$\phi$	Fázová změna	$[-]$
$\lambda$	Vlnová délka laserového světla	$[m]$
$\mu$	Poissonovo číslo	$[-]$
$\pi$	Ludolfovo číslo	$[-]$

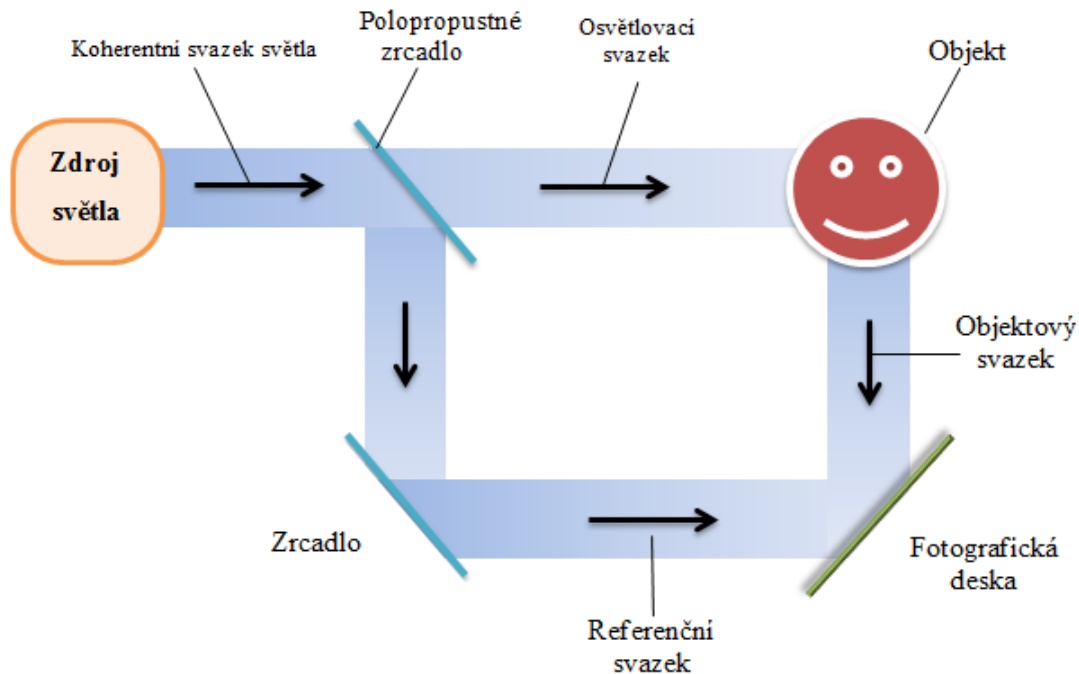
# 1. Úvod

## 1.1. Historie holografie

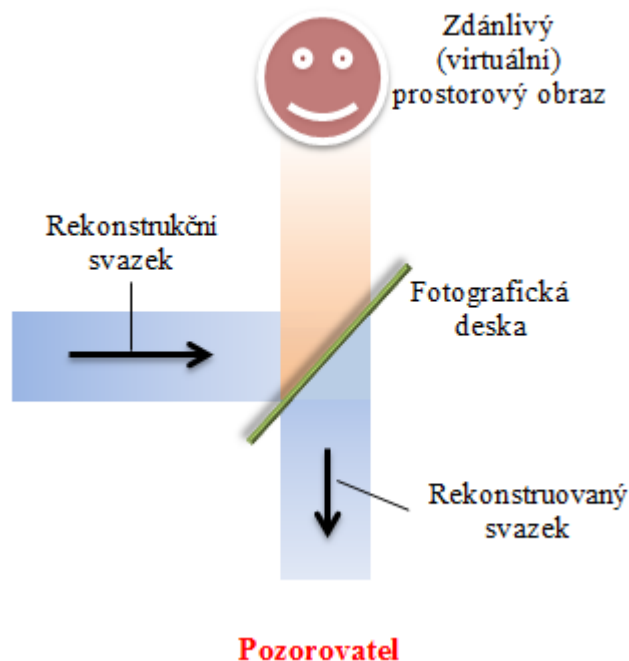
Holografie jako taková se zabývá záznamem a rekonstrukce intenzity vln, přičemž první myšlenka vznikla v roce 1948 anglickým fyzikem Dennisem Gaborem. Vlny můžou být různého druhu, například světelné, zvukové, rentgenové či korpuskulární. Princip holografie je schopen registrovat důležité informace dané vlny jako jsou její amplituda a fáze. Tím pádem umí zachytit prostorovou strukturu vlny.

Jelikož holografický záznam fáze a amplitudy je kódovaný ve formě interferenčního světla, vytváří vlnové pole odražené od zkoumaného objektu. Tudiž pokud při zkoumání vlnového pole měníme pozorovací polohu, vidíme objekt pod různými úhly, a proto ho vnímáme jako prostorový.

Na rozdíl od běžné fotografie, která zachycuje bod po bodu intenzitu jednotlivých paprsků světla, holografie umožňuje trojrozměrný záznam předmětu na dvourozměrný obrazový nosič, jako jsou citlivá vrstva fotografického filmu, emulze na skle, plastová folie, kam se запиše informace jak o intenzitě, tak i o fázi světla odraženého od předmětu.



Obr. 1 Nákres záznamu hologramu



Obr. 2 Náčrtek rekonstrukce hologramu

Jednou z příčin pozdějšího objevení principů holografie byl nedostatečný průlom v potřebných experimentálních zařízeních. První experimenty musely být prováděny za pomoci rtuťové lampy. Rapidní nárůst experimentální holografie, využitelné v mnoha odlišných případech, mělo zapříčinění vynálezu laseru a zavedení mimosové holografie.

Další otázka ve vývoji holografie nastala při možnosti realizace hologramu v reálném čase. Prozatím taková realizace nebyla možná bez použití fotorefrakčních polynomů či jiných nelineárních materiálů. V poslední době, kdy vývoj vůbec celé experimentální problematiky rapidně vzrostl, se začaly využívat nové elektronické systémy snímání obrazu za použití soustav CCD kamer s digitálním zpracováním obrazu. Pánové Schnars a Jueptner jako první v roce 1994 použili soustavu CCD kamer s připojením k počítači.



## 1.2. Základní rovnice holografie

V předchozí kapitole byla popsána stručná historie a vývoj holografie. Dále se budeme zabývat základními rovnicemi popisujícími princip vytváření hologramu odrazem světelné vlny od objektu, respektive průchodem světelné vlny přes objekt.

Předpokládejme, že objektový svazek světelných vln a referenční světelná vlna dopadá na fotografickou desku a že komplexní vektory amplitud těchto vln jsou orientované kolmo na nákres, tudíž můžeme uvažovat výpočty jako skalární.

Tyto komplexní amplitudy můžeme vyjádřit v rovině  $x,y$  ve tvaru

$$E_0 = A_0 \cdot e^{-j\varphi_0} \quad E_f = A_f \cdot e^{-j\varphi_f},$$

(1.1) kde  $A_0, A_f, \varphi_0, \varphi_f$  označují amplitudu a fázi objektové a referenční vlny a také jsou funkcí souřadnice  $x,y$ .

Pokud jsou světelné svazky koherentní, na záznamovém prostředí vytvářejí interferenční pruhy o intenzitě  $I(x,y)$ .

$$I(x,y) = |E_0 + E_f|^2 = (E_0 + E_f) \cdot (E_0^* + E_f^*) = A_0^2 + A_f^2 + E_0 E_0^* + E_f E_f^* \quad (1.2)$$

kde  $E_0^*, E_f^*$  jsou komplexně sdružené veličiny k amplitudám  $E_0, E_f$ .

Opět předpokládejme, že amplitudovou propustnost hologramu je možné vyjádřit ve tvaru

$$T = b_0 + b_1 I t \quad (1.3)$$

kde  $b_0, b_1$  jsou koeficienty charakterizující propustnost záznamového prostředí a  $t$  je čas expozice hologramu.

Dosadíme-li rovnici (1.2) do rovnice (1.3), může se výraz pro amplitudovou propustnost zapsat takto

$$T = b_0 + b_1 (A_0^2 + A_f^2) t + b_1 t (E_0 E_f^* + E_f E_0^*) \quad (1.4)$$

Pokud hologram osvětlíme rekonstrukční vlnou  $E_k$ , můžeme zapsat vztah pro šíření světelného pole za záznamem

$$E_r = T E_k = [b_0 + b_1 (A_0^2 + A_f^2) t] E_k + b_1 t (E_0 E_f^* E_k + E_f E_0^* E_k) \quad (1.5)$$

Takto zapsaný vztah formálně vyjadřuje základní rovnici holografického procesu.

Pokud rekonstrukční světelnou vlnu považujeme za stejnou s referenční, pak bude v zásadě platit  $E_k = E_f$ . Následnou úpravou rovnice (1.5) získáme zcela nový tvar rovnice

$$E_r = [b_0 + b_1(A_0^2 + A_f^2)t]E_f + b_1tA_f^2E_0 + b_1tE_f^2E_0^* \quad (1.6)$$

Světelné pole za hologramem je vyjádřené součtem třech členů. První z nich představuje komplexní amplitudu  $E_f = E_k$  referenční, neboli rekonstrukční vlny vynásobenou výrazem  $b_0 + b_1(A_0^2 + A_f^2)$  vyjadřující vlnu nultého řádu. Druhý člen představuje světelnou amplitudu  $E_0$  objektového světelného svazku vynásobenou výrazem  $b_1tA_f^2$ . Tento člen je vlastně hologramem rekonstruovaná vlna, vlna o 1 řád vyšší, která vytváří virtuální trojrozměrné zobrazení objektu umístěné tam, kde se nacházel objekt při vytváření hologramu. Třetí, zároveň poslední člen představuje komplexně sdruženou amplitudu  $E_0^*$  objektové světelné vlny, tedy vlny o 1 řád nižší, vynásobenou komplexním výrazem  $b_1tE_f^2$ , která vytváří zkreslený skutečný obraz objektu. Pro získání nezkresleného skutečného objektu je zapotřebí hologram osvětlit rekonstrukčním světelným paprskem  $E_k = E_f^*$ , který je komplexně sdružený k referenčnímu paprsku, který má opačný směr a stejnou křivost čela co do velikosti, ale opačného znaménka.

## 2. Principu a aplikace metody ESPI

### 2.1. Úvod ESPI

Dnešní průmyslový trh vyžaduje vysoce kvalitní návrhy komponent ve velmi krátké době, které by splňovaly ty nejprísnější mechanické vlastnosti a konečné bezpečnostní normy. Zejména v automobilovém a leteckém průmyslu se vývoj zaměřuje především na design či řešení dle specifikace zákazníka. Z pohledu hospodářské problematiky se optimalizace stala klíčovým tématem.

V posledním desetiletí mnoho průmyslových odvětví představilo Computer-Aided Engineerig (CAE), nástroje s cílem snížit počet prototypových sestavení a urychlit tak čas vývojového cyklu. Ačkoli tyto analytické nástroje jsou poměrně levné a rychlé v porovnání s nákladným tradičním postupem testování návrhu, existuje mnoho proměnných, které CAE nemohou dostatečně zvážit. Jsou to například výrobní procesy, montáže, materiálová anizotropie a zbytkové napětí. Proto je stále vhodné testování pro ověřování CEA výsledků.

Tradiční konvenční experimentální techniky využívají odporovou tenzometrii pro vyhodnocení poměrné deformace a napětí. Nicméně, i když jsou tenzometry finančně nenáročné a robustní pro dynamická namáhání, trpí množstvím nedostatků. Hlavním nedostatkem je schopnost pouze bodového měření, se kterým nelze zachytit skutečnou informaci s vysokým rozlišením v oblastech vysokého gradientu poměrných deformací. Dále tenzometry vyžadují časově náročné a pečlivé aplikování. Vzhledem k těmto úskalím nejsou tenzometry vhodné pro validaci CAE.

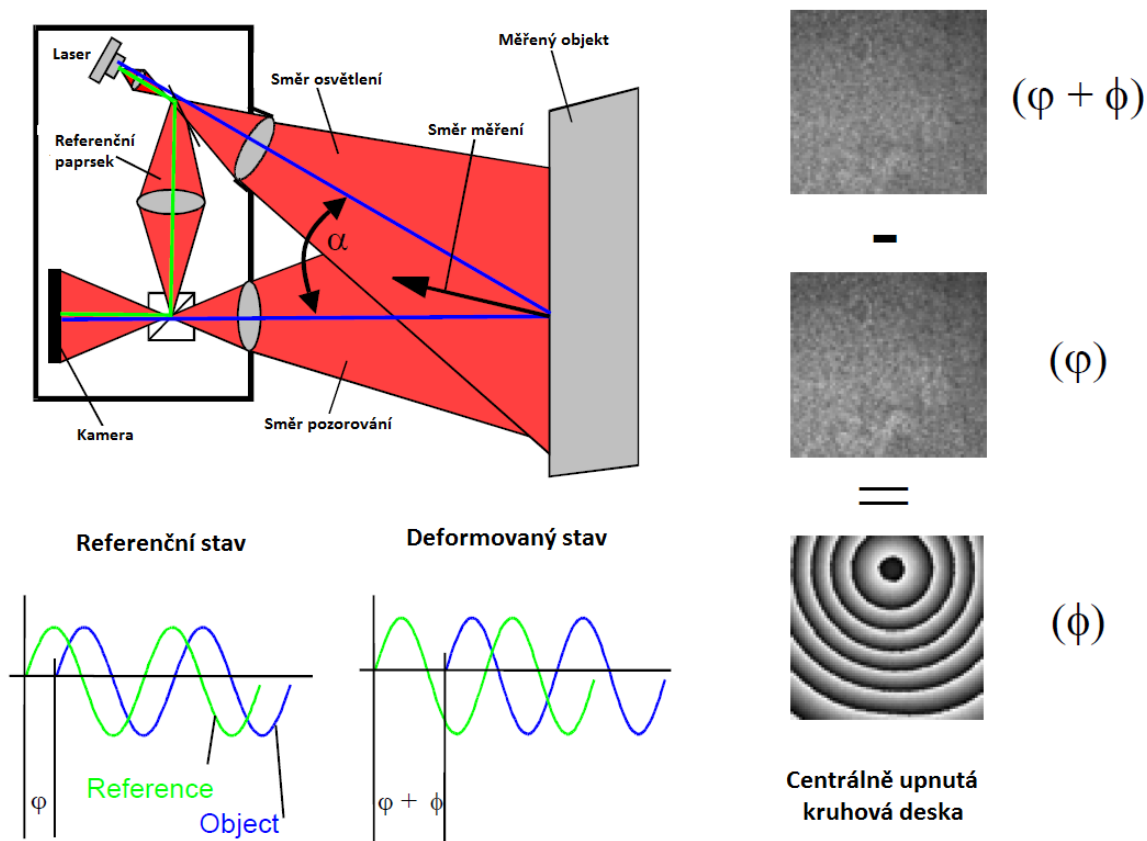
V současné době mnoho firem hledá novou vyspělou experimentální techniku pro deformačně/napěťovou analýzu, a to za účelem zefektivnění nákladů a překonání klasických metod. Tyto náročné požadavky trhu vedly ke snaze, vymyslet nový optický měřicí přístroj, který by byl schopen překonat výše uvedené problémy. Electronic Speckle-Pattern Interferometry (ESPI), jako plnohodnotný, bezkontaktní měřicí technický systém nabízí cenově přijatelné, rychlé, spolehlivé a vysoce přesné měřicí zařízení. Na základě lehkého a malého designu snímače, spolu s novou koncepcí skleněných vláken dosáhla realizace ESPI v testování materiálu úrovně výzkumu v průmyslu. V současné době ESPI slouží jak k detekci velmi malých deformací s vysokým rozlišením ( $50\mu m$ ), tak i k odhalování kritických oblastí v časných stádiích testování.

Ačkoli způsob je dobrý, standartní ESPI nastavení trpí mnoha omezeními. Některé z těchto omezení vyplývají z relativně velké tuhosti tělesa při pohybu konstrukčních prvků v rámci testu, drsného environmentálního prostředí, vibrací a komplexní geometrie analyzovaného komponentu. Avšak tato omezení vytvořila potřebu pro robustnější design pro měření deformací. Nově navržený systém firmou *Dantec-Dynamics Q-100* disponuje laser-optickým senzorem pro kvantitativní napěťově deformační měření, které můžou být široce využívány v průmyslu. Pojem radikální miniaturizace 3D-ESPI technologie, spolu s kombinací měření kontur a posuvů, poskytuje všechna nezbytná data pro kvantitativní 3D analýzu. Jak bude popsáno v následující kapitole.

## **2.2. ESPI – Princip systému Q-100**

Electronic Laser Speckle Interferometry umožňuje, prostřednictvím definovaného řízeného svazku světla, plnohodnotné a třídimenzionální měření deformací  $\Delta\delta$  souboru ploch. Princip je poměrně jednoduchý, pro znázornění je vyobrazeno schéma na Obr 3: povrch měřeného objektu je osvětlen laserovým světlem ze čtyř různých směrů a odražené světlo je zaznamenáváno CCD kamerou s vysokým rozlišením. Všechny osvětlené plochy

zobrazují tzv. „skvrnitý efekt“ (objevuje se jako otisk osvětlené plochy), podle kterého může být mikrostruktura testovaného prvku analyzována. Výsledný „skvrnitý efekt“ je uložen jako digitální referenční snímek. Specifický skvrnitý vzor se mění s deformací zkušebního vzorku, proto korelační okraje zastupující posuv  $\Delta\delta$  budou viditelné.



Obr. 3 Schéma měření - [3]

Vhodnost srovnání či korelaci techniky umožňuje detekci třidimenzionálního pohybu (tenzoru deformace) jakéhokoli bodu v prostoru měření s velmi vysokou přesností. V závislosti na geometrii nebo směru osvětlení laserového paprsku odpovídají vypočtené okraje s vnější rovinou či vnitřní rovinou posunutí. Tenzor deformace (2.1) lze vypočítat v každém bodě měřené oblasti pomocí základních mechanických rovnic.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \varepsilon_{xb} &= -\frac{t \cdot \partial^2 w}{2 \partial x^2}, \quad \varepsilon_{yb} = -\frac{t \cdot \partial^2 w}{2 \partial y^2}, \quad \varepsilon_{xb} = -\frac{t \cdot \partial^2 w}{\partial x \partial y}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

Před zdeformováním měřeného objektu je rozdíl fází mezi objektem a referenčním paprskem roven  $\phi$ . Po zdeformování objektu se fázový rozdíl změní na  $(\phi + \phi)$ . Kvantitativní měření fázových dat lze získat použitím fázového posunu. Díky rozdělení fází lze fázovou změnu  $\phi$ , po deformaci objektu, jednoduše stanovit po odečtení fáze  $\phi$  z fáze  $(\phi + \phi)$ . Příklad s kruhovou deskou je znázorněn na Obr.3.

Pokud je CCD kamera ve směru osy  $z$  a laserové osvětlení leží v rovině  $xz$ , fázová změna bude dána vztahem:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [u \cdot \sin\alpha + w \cdot (1 + \cos\alpha)] \quad (2.2)$$

Pro osvětlení v rovině  $yz$  pak platí vztah:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [v \cdot \sin\alpha + w \cdot (1 + \cos\alpha)], \quad (2.3)$$

kde:  $\lambda$ ... je vlnová délka laserového světla  
 $\alpha$ ...osvětlovací úhel  
 $u, v, w$ ...představuje složky posunutí ve směru  $x, y, z$

### 2.3. Problematika absolutní fáze

Vzhledem k procesu hodnocení a běžně používaných fázových posunů náleží pro první výsledky z interferometrického měření fázový modul  $2\pi$ . Užitím speciálního rozbalovacího algoritmu můžou být fázové kroky odstraněny, čímž může nastat vychýlení fázové funkce. Proto fáze v obockém bodě  $P(x, y)$  má tvar:

$$\phi(x, y) = s(x, y) \cdot L(x, y) + n \quad (2.4)$$

Kde:  $s$ ...je citlivost  
 $L$ ...vektor posunutí  
 $n$ ...neznámý fázový sklon.

Při použití pouze rovnice (2.4) není kompletní výpočet vektoru posunutí možný. Pokud se měření provádí za pomoci tří lineárních, nezávislých směrů osvětlení, vede to k výpočtu pomocí tří rovnic, které mohou být zapsány v maticovém tvaru:

$$\Phi = S \cdot L + N \quad (2.5)$$

Kde:  $\Phi$ ...je vektor skládající se z měřených fází  $\phi(x, y)$   
 $S$ ...je matice skládající se z vektorů citlivosti  $s(x, y)$   
 $L$ ...jsou vektory posunutí  
 $N$ ...fázový posun pro každé měření

Jelikož ve třech rovnicích je stále šest neznámých, pro kompletní výpočet budou zapotřebí další potřebné informace. Jeden způsob, jak tento problém překonat je dostat další informace o vektoru posunutí v jednom bodě oblasti měření. Z této fázové odchylky pro daný bod je možno dopočítat odpovídající směr měření. Pak může být rovnice transformována na vztah:

$$L = S^{-1} \cdot (\Phi - N) \quad (2.6)$$

Prakticky to lze provést pomocí dalších měřících systémů s možností měřit absolutního posunutí daného bodu měřené oblasti. Dalším způsobem je vytvoření pevného spojení mezi optickým senzorem a objektem v zorném poli. Pak bude v tomto bodě relativní posunutí 0.

Odlisný přístup je založen na využití dalšího směru citlivosti. Se čtyřmi měřeními směry získáme čtyři fázové hodnoty pro každý bod, ale také čtyři neznámé hodnoty fázového posunu. Fázový posun je konstantní přes zorné pole. Proto při pohledu na více než jeden bod bude poskytovat více rovnic pro určení neznámých. Např. při pohledu na 4 body máme 16 neznámých (4 vektory posunutí a 4 fázové posuny) ale také 16 známých hodnot (4 fázové hodnoty v každém bodě). Nyní může být problém vyřešen bez jakýchkoli dodatečných informací. Tyto rovnice lze zapsat ve formě matice jako:

$$\Phi = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & S_2 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & S_3 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & S_4 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ N \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Kde:  $S_j$ ... je sub-matice skládající se ze čtyř řádků a tří sloupců  
 $I$ ... je jednotková matice  
 $L_j$ ... je vektor posunutí  
 $N$ ... je vektor čtyř neznámých fázových posunů

Tato rovnice může být správně vyřešena, pokud matice není singulární. Proto je zapotřebí měnit citlivost vektorů v různých bodech. Tak jako předpoklad pro každý směr měření, citlivost směru musí být změněna a neměla by být konstantní.

## 2.4. Popis měřicího systému Q-100

Q100 je v podstatě unikátní zařízení pro rychlé, nedestruktivní měření pole deformace a napětí na komponentu součásti bez jakékoli přípravy komponentu či jeho značení.



Obr. 4 Snímací hlava Q-100 - [3]

### 2.4.1. Konstrukční řešení Q-100

Systém Q100 je speciálně navržený pro rychlé testování přímo na ploše komponentu, jež zajišťuje redukční kroužek s vyměnitelnými hroty. Počet hrotů na redukčním kroužku je libovolný, avšak ideální počet jsou tři. Systém je schopen automatického provedení analýzy kontur plochy a tří-dimenzionálních deformací sledované plochy při zatížení měřeného komponentu. Během několika sekund je schopný z výše uvedených údajů odvodit napěťové pole komponentu. Jednou z hlavních předností je možnost měření bez náročnější předešlé přípravy, což výrazně snižuje dobu testování v porovnání s obdobnou metodou, například odporovou tenzometrií.

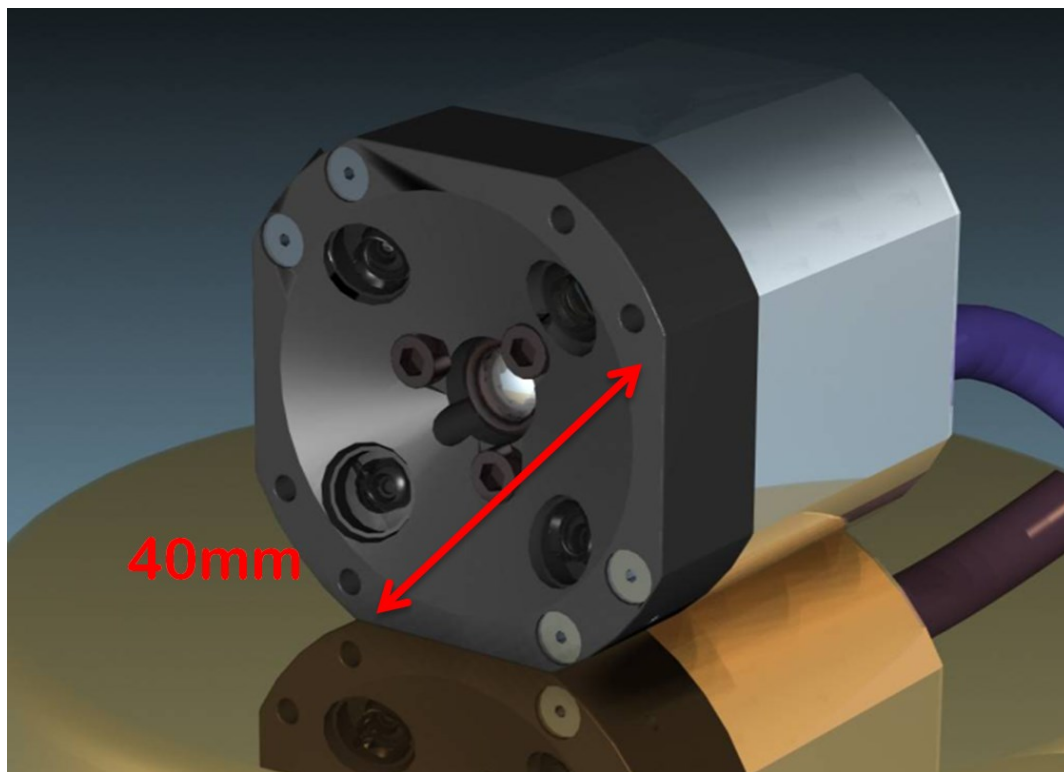
### 2.4.2. Základní informace o měření

Kompletní optické měření umožňuje detekci gradientů napětí a tím zvyšuje spolehlivost deformační analýzy. Záznam kompletních povrchových informací umožňuje výpočet všech relevantních dat, jako jsou například hlavní napětí, smyková napětí, normálová napětí, poměrné deformace složky posuvů apod.

### 2.4.3. Princip měření

Jak už bylo zmíněno, Q-100 využívá princip 3D speckle interferometrie pro měření deformací a kontur ploch v měřeném poli. Měřená plocha je osvětlována laserovým paprskem ze 4 různých směrů a rozptýlené světlo je zaznamenáváno pomocí centrálního CCD čipu. Díky interferenčním účinkům laserového světla jsou posunutí měřené plochy zaznamenána s přesností odpovídající  $1 \cdot 10^{-6}m$ . Navíc je zaznamenáván trojrozměrný

povrch geometrie, což umožňuje uživateli automaticky kvantifikovat deformace a poměrné deformace na trojrozměrném povrchu. Se známými materiálovými vlastnostmi, jako jsou Youngův modul či Poissonovo číslo, může být také zjištěno v oblasti měření rozložení napětí.



Obr. 5 Orientační model snímací hlavy – [3]

#### 2.4.4. Aplikace systému Q-100

Snímací hlavu je možné přímo připojit ke zkoumanému vzorku či komponentu. Součástí základního systému je sada různých montážních zařízení, které umožňují snadnou adaptaci snímací hlavy pro ploché, zakřivené i různě profilované plochy. Systém Q-100 umožňuje rychlou a snadnou kalibraci a nevyžaduje žádné speciální školení pro spolehlivé použití. Je to snadno a rychle využitelný systém v širokém rozsahu testování.



<b>Měřicí rozlišení</b>	
Posunutí	0,3...0,1 μm
Poměrné deformace	$5 \cdot 10^{-6} \dots 20 \cdot 10^{-6}$
Měřicí plocha	cca 35x25 mm <sup>2</sup>
Rozsah měření	1/10 deformace
Prostorové rozlišení	cca 0,5mm
Rozměry snímací hlavy	54 x 54 x 59mm <sup>3</sup>
Váha měřicí kamery	370g
Délka měřicího kabelu	4,5m
Výstupní data	Datové pole s Napět'ovo/deformačními prvky, Smykové napětí a poměrné deformace, Hlavní napětí a poměrné deformace.
Datové rozhraní	TIFF, ASCII, Windows metafile
Operační systém	Windows XP

**Tab. 1** Technické parametry Q-100

### 3. Popis trhacího stroje Testometric M500-50CT

Jedná se o plně digitální zkušební systém s vysokou přesností ovládání. Díky automatizovanému řízení zkušebních metod je dosaženo velmi jednoduchého ovládání. Součástí stroje jsou samonastavitelné siloměrné snímače s vysokým rozlišením. Tyto snímače mají možnost automatického rozlišení a okamžitou kalibraci. Systém disponuje 800% ochranu proti přetížení silového snímače bez jeho zničení. Dále je díky svým kompaktním rozměrům zapotřebí pouze malá pracovní plocha. Vysoce efektivní, předzatížená, samočisticí kulová ložiska zaručují tiché a především rychlé měření. Přesné řízení příčnicku zaopatřuje AC servo pohon s bezkartáčovým motorem, nevyžadující údržbu. Rám i příčník s plným profilem disponuje velkou tuhostí, stejně tak i podpůrný tažený sloup pro upevnění nejrůznějšího příslušenství. Neméně důležitý je i velký rozsah čelistí a přípravků pro zkoušení v tahu, tlaku, ohybu, smyku atd. Díky 4 výstupním kanálům lze dosáhnout velmi rychlého sběru potřebných dat. Pro zapojení dalšího vybavení jako jsou nejrůznější extenzometry, mikrometry, váhy, posuvná měřítka či tloušťkoměry, má zkušební stroj dalších 6 zabudovaných I/O kanálů.



Obr. 6 Trhací stroj Testometric M500/50CT – [4]

<b>Kapacita <math>kN</math></b>	50	<b>Rychlost snímání dat</b>	Max 12kHz do 200Hz rámu
<b>Přesnost</b>	+/- 0.5% až na 1/1000th jejich jmenovité hodnoty	<b>Rozměry <math>\bar{s} \times h \times v</math></b>	762 x 505 x 1585
<b>Pracovní prostor / výška v <math>mm</math></b>	1180	<b>Hmotnost <math>kg</math></b>	245
<b>Dráha příčnicku / rozlišení v <math>mm</math></b>	1050 x 0.001	<b>Napájení</b>	115 nebo 230V 1ph 50/60Hz
<b>Pracovní šíře v <math>mm</math></b>	420	<b>Teplota pracovního prostředí <math>^{\circ}C</math></b>	-10 až +40
<b>Tuhost rámu <math>kN/mm</math></b>	200	<b>Vlhkost pracovního prostředí</b>	+10% až +90%
<b>Rychlost – rozsah <math>mm/min</math></b>	0.001 - 1000	<b>Provedení stroje</b>	Stolní
<b>Přesnost rychlosti</b>	+/- 0.1% za stálých podmínek	<b>Počet sloupů</b>	2
<b>Vedení příčnicku</b>	Lineární vedení příčnicku	<b>Dodatelné siloměrné články</b>	5N, 10N, 20N, 100N, 250N, 500N, 1kN, 10kN...50kN Max lze použít 4 články
<b>Maximální síla v plné rychlosti <math>kN</math></b>	50	<b>Čep <math>\Phi</math> <math>mm</math></b>	30
<b>Maximální rychlost v úplném zatížení <math>mm/min</math></b>	600	<b>Příkon <math>kW</math></b>	1

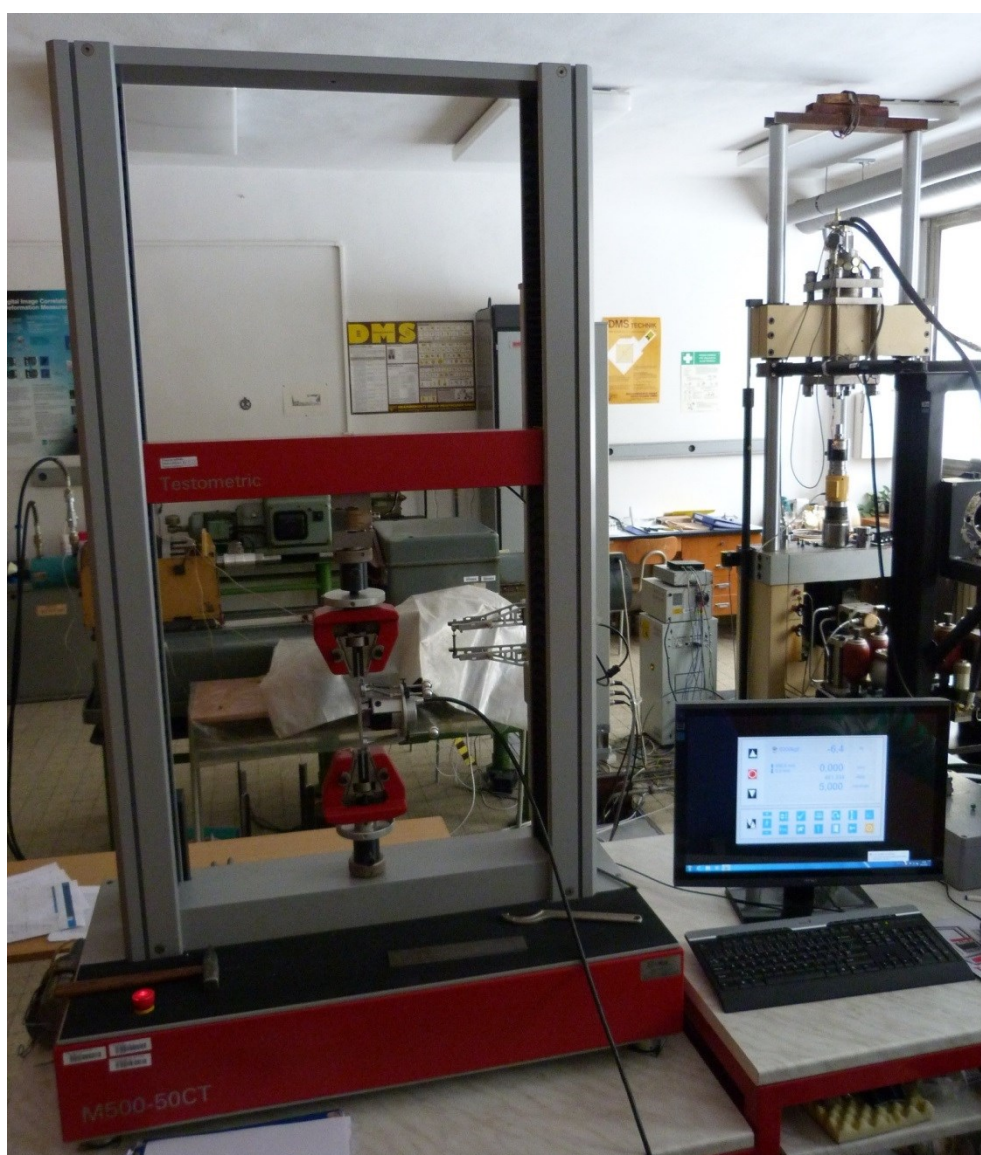
Tab. 2 Technické parametry trhačino stroje Testometric – [4]

Dodávaný software je univerzální zkušební program winTest TM Analysis. Jedná se o více-funkční, plně přizpůsobitelný software, který podporuje specifikace mezinárodních norem, jako jsou ISO, EN, ASTM, BS, včetně norem českých a slovenských. Podporované specifikace zkoušek zahrnují mimo jiné pevnost v tahu, v tlaku, průhyb, stříh, ale i zkoušky trhání, průraz, adhezi, cyklování, a tvrdost. Významnou výhodou je snadná a rychlá změna jazykového prostředí. Zkoušení může například probíhat v českém jazyce, výsledný protokol v některých z na definovaných jazycích (angličtina, němčina, italština, francouzština atd.).

## 4. Zpracování jednoduchých technických úloh

### 4.1. Demonstrující úloha1 – namáhání tahem

V následující kapitole bude demonstrováno zpracování technických úloh na vzorcích jednoduchých geometrických tvarů, jež byly namáhány základními způsoby namáhání. Jednalo se především o namáhání ohybem, tahem či smykem. Namáhání bylo prováděno ve školní laboratoři, pomocí trhačního stroje Testometric M500-50CT, zobrazeného na Obr 7. Nedílnou součástí demonstrace úloh bude v úvodu stručné seznámení s průběhem daných zkoušek, které bude doplněno přiloženou animací a také způsob vyhodnocení výsledných hodnot.



Obr. 7 Zobrazení trhačního stroje Testometric ve školní laboratoři

Výběr vzorků nebyl nijak zvlášť omezen, jen každému druhu namáhání odpovídá odlišný geometrický tvar vzorku. Jak již napovídají níže uvedené snímky vzorků,



demonstrační úloha bude provedena na plochem vzorku s kruhovým otvorem, zatěžovaný prostým tahem. Důležitou operací před každým měřením bylo nanesení tenké vrstvy speciální barvy s opticky drsným povrchem, která má za úkol zaručení správného odrazu světelných paprsků od zkoumaného vzorku.

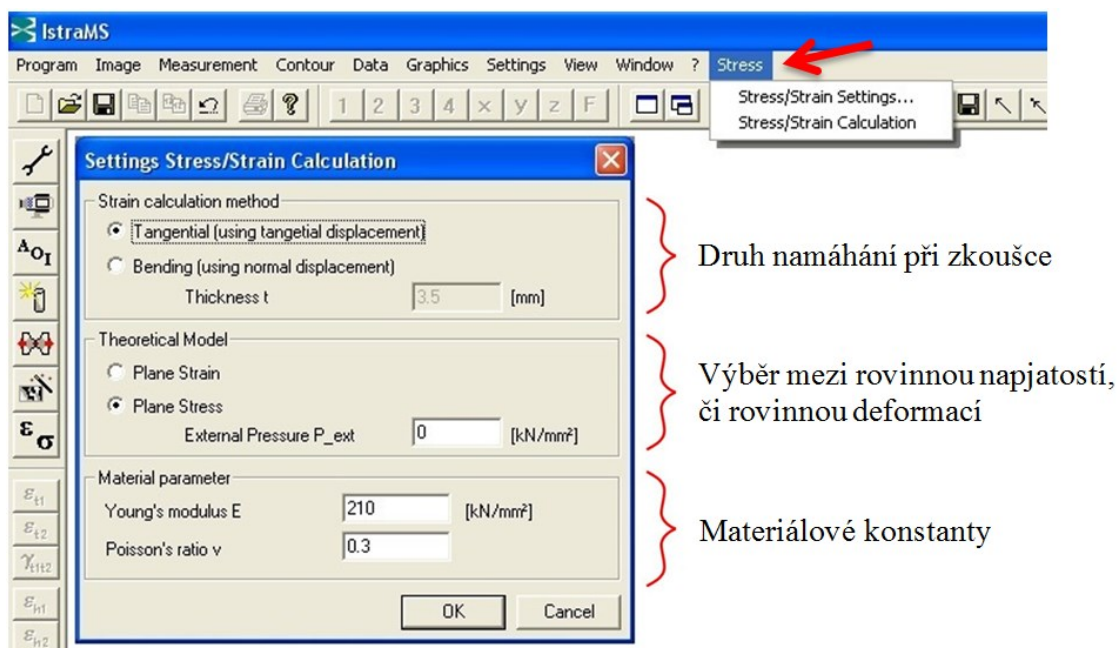


Obr. 8 Upnutý zkoumaný vzorek s kruhovým otvorem

Po správném upevnění snímací hlavy na přichystaný vzorek a následném umístění celé měřicí soustavy do čelistí trhačického stroje, viz Obr. 8, bylo velmi nutné, aby byl vzorek několikrát zatížen. Toto zatížení zajišťovalo mnohonásobně lepší a pevnější usednutí vzorku v čelistech stroje a z toho důvodu též zabezpečovalo získání přesnějších výsledků z měření.

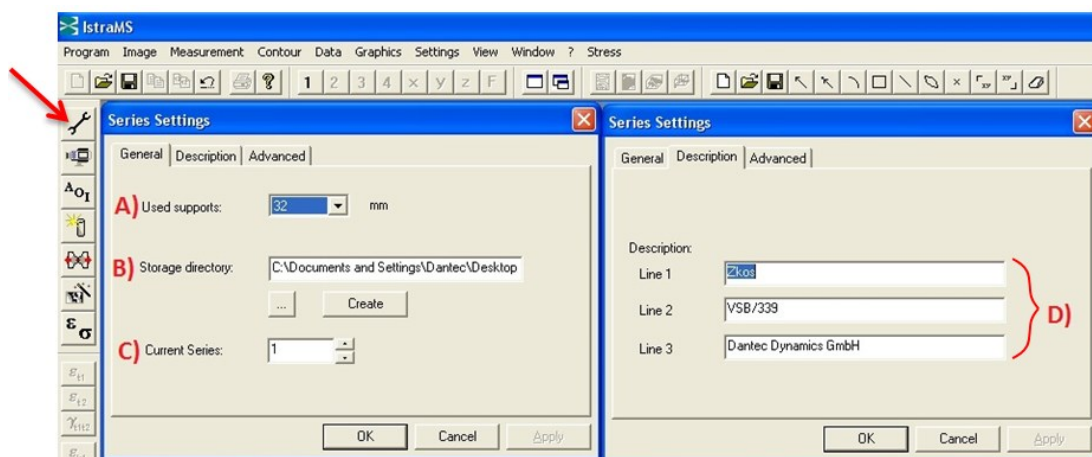
Další krok analýzy spočívá v základním nastavení použitého softwaru Istra Q-100, kde je nutné zvolit metodu pro vyhodnocení (Obr.9) dále rovinnou napjatost či rovinnou deformaci, v našem případě rovinnou napjatost a nakonec zvolíme materiálové konstanty potřebné k vyhodnocení zkoušek. Jsou to tyto konstanty:

Youngův modul (Modul pružnosti v tahu)	E	[MPa]
Poissonovo číslo	$\mu$	[-]



Obr. 9 Základní nastavení Softwaru Istra Q-100

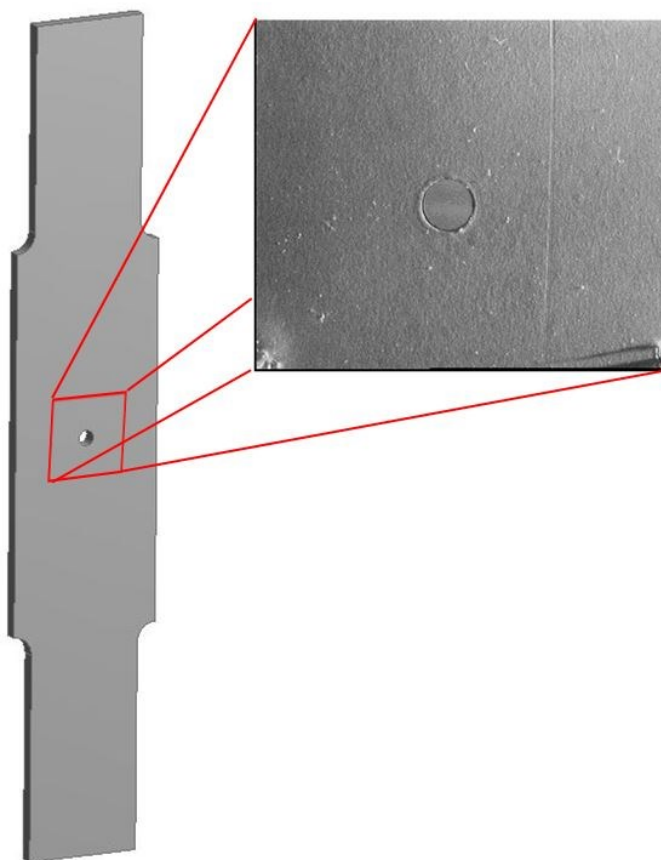
Software nabízí také možnost výběru adresáře jako uložení dat a také popis řešení, jež usnadňuje orientaci ve větším počtu podobných úloh. Taktéž velmi důležité nastavení spočívá ve vzdálenosti snímací hlavy od zkoumané oblasti. Tuto vzdálenost určují upínací hroty na snímací hlavě.



Obr. 10 Následné nastavení

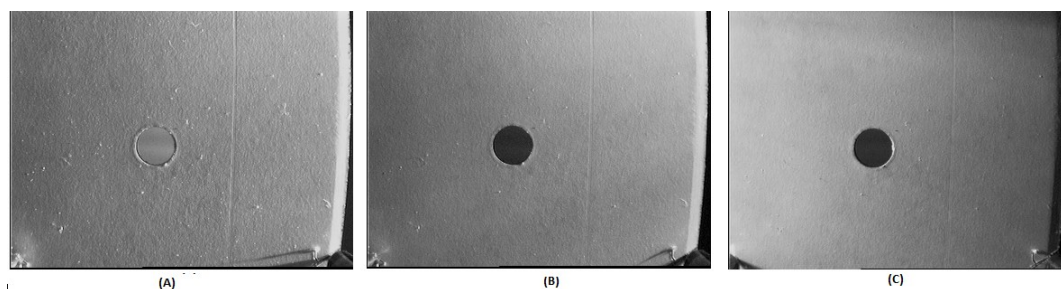
- Kde:
- A) je délka hrotů na snímací hlavě
  - B) je cesta k úložišti
  - C) je číslo aktuálního měření
  - D) je popis aktuálního měření

V pořadí třetím krokem nastavení softwaru pro danou analýzu je pořízení referenčního snímku, podle kterého může být povrch testovaného prvku analyzován. Pro lepší znázornění jsou níže uvedeny příklady referenčních obrazů (obr.11-12).



**Obr. 11** Referenční snímek zkušební vzorku

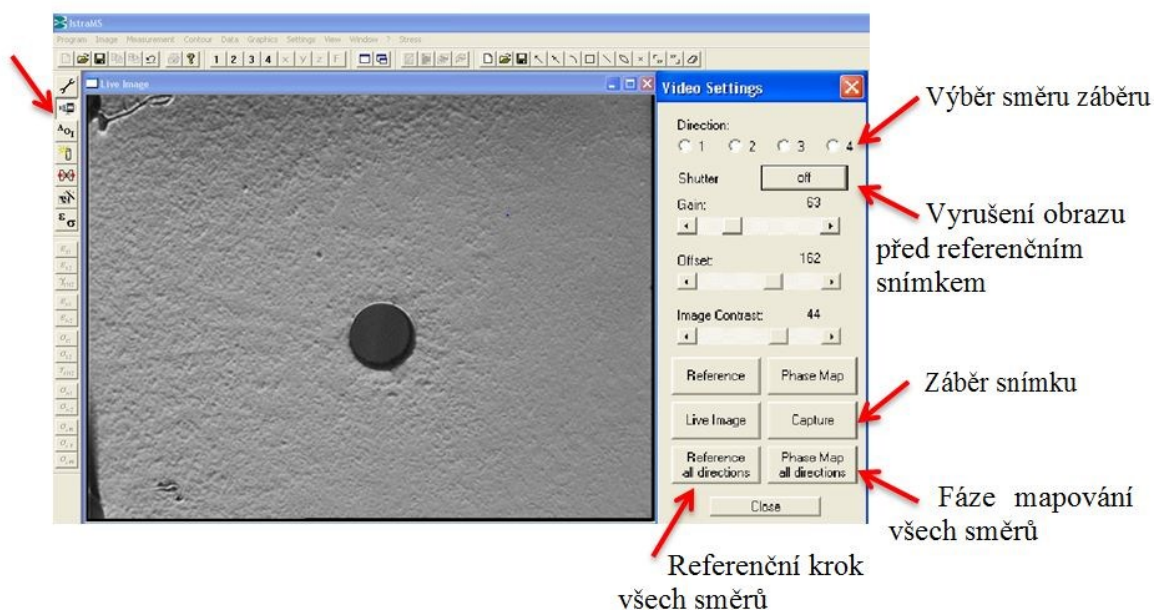
Na obrázcích si lze zřetelně povšimnout, že intenzita či směr dopadajícího světla nejsou vždy stejné. Přesněji potom na obrázcích A; B; C, které pocházejí z opakování stejného měření. Proto by v zájmu renovace bylo vhodné vybudovat či zkonstruovat statické osvětlovací rameno, zaručující osvětlení jak se stejnou intenzitou, tak i se stejným směrem dopadajících paprsků.



**Obr. 12** Příklady referenčních snímků

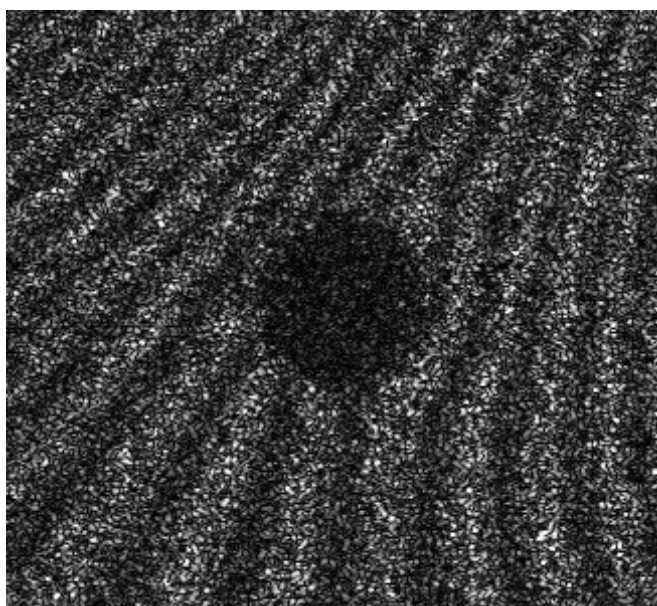


Na následujícím obrázku můžeme vidět, zatím neosvětlený vzorek, připravený pro zachycení referenčního obrazu. Předem je nesmírně důležité, tzv. vyrušení obrazu, dále důkladné nasvícení a nakonec zachycení a uložení obrazu.



**Obr. 13 Kamerové nastavení**

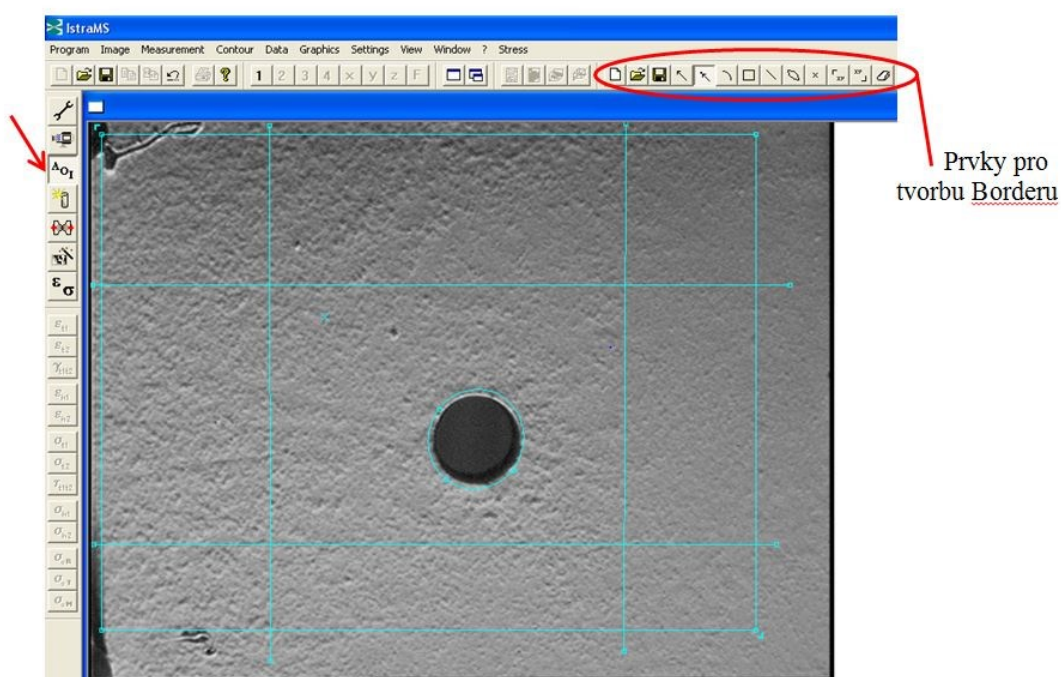
Následující operací bude zachycení referenčního kroku, fázových, neboli Moirého interferenčních pruhů a fázové mapování ve všech snímaných směrech. Tuto operaci provedeme stiskem tlačítka „Reference all directions“, zatížením silou pro námi zvolený referenční krok a poté potvrzení a stiskem tlačítka „Phase Map alldirections“, jež uložíme ve formátu (TFS).



**Obr. 14 Interferenční pruhy (Speckles)**

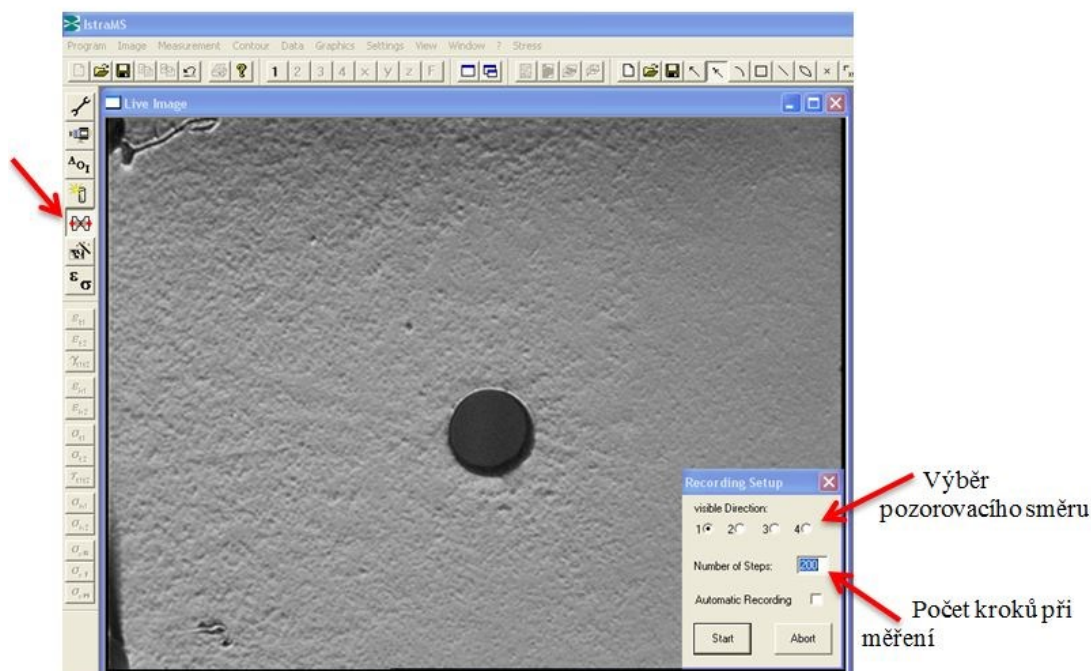


Nyní v pořadí čtvrtém kroku po tvorbě a uložení referenčního snímku musí být zvolena oblast vyhodnocování analýzy. V tomto kroku je především nutné dbát zvýšené přesnosti při výběru oblasti, jelikož nesprávné zvolení může mít za následek rapidní snížení přesnosti analýzy. Po vytvoření vyhodnocoací oblasti, která musí být označena značkou ve tvaru křížku, je opět nutné uložení obrazu, ale již do formátu (ber).



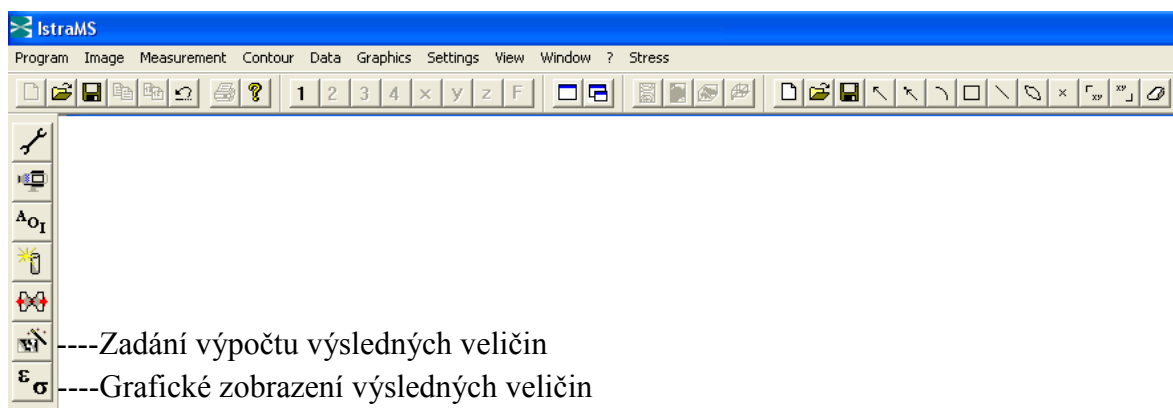
Obr. 15 Ořezání snímané, výpočtové oblasti

Pátý krok spočívá v nastavení aktuální snímací kamery, která slouží pouze pro vizuální kontrolu průběhu měření, a proto nemá žádný vliv na průběh měření. A dále v určení počtu kroků, u kterého je většinou doporučeno ponechat původní hodnotu. Měření lze v jakémkoli kroku ukončit bez následku ohrožení výsledných hodnot.



Obr. 16 Nastavení počtu kroků při měření

Po zpracování všech zvolených kroků měření zbývá již zadání výpočtu výsledných veličin vycházejících z provedené zkoušky, viz obr.17.



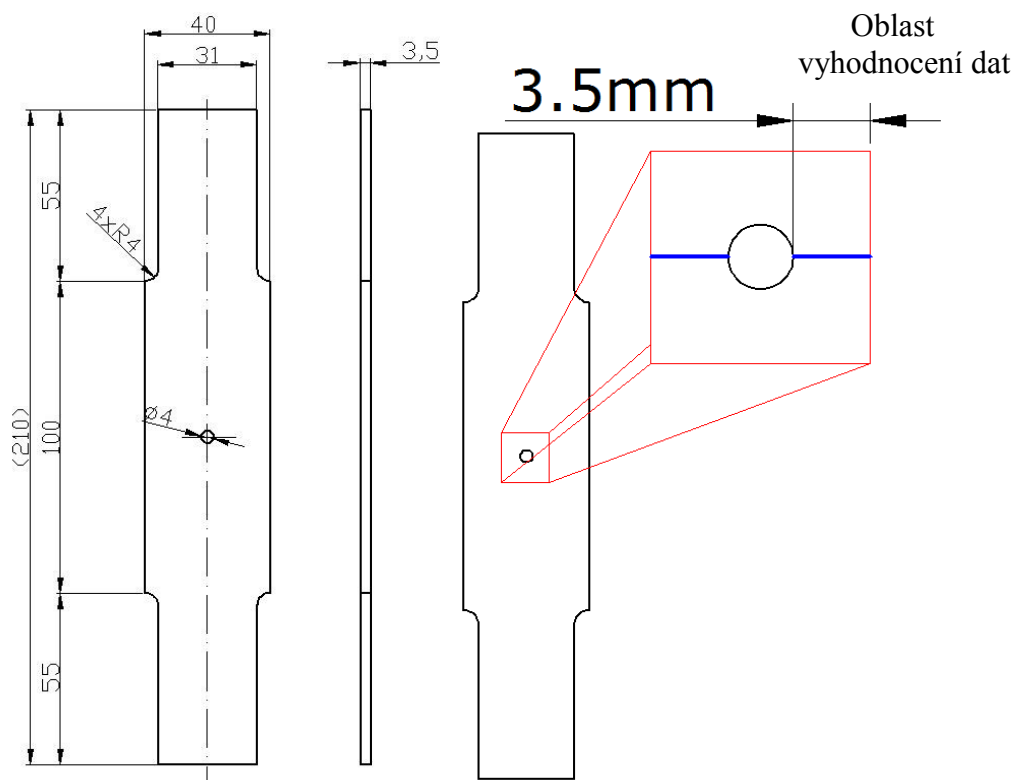
Obr. 17 Vyhodnocení a výpočet výsledných veličin

V nynější kapitole byla popsána problematika a postup měření metodou ESPI, jež by měla sloužit jako stručný návod pro seznámení se s touto metodikou měření. V následující kapitole budou rozebrány a posouzeny výsledné hodnoty vyplývající z předešlých měření základních technických úloh. Tyto poznatky budou komentovány a porovnávány s hodnotami získanými z metody konečných prvků.

#### 4.1.1. Vyhodnocení demonstrační úlohy

Pro srovnávání výsledných hodnot, převážně hlavních napětí nebo v některých případech normálového napětí, redukované napětí či posunutí, jsme museli vycházet z mnoha předpokladů. Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, odlišnost výsledků s jinými metodami může být v některých případech značná. Již před měřením a v průběhu měření může ovlivňovat toto měření mnoho faktorů, jež jsou materiálové vlastnosti, kvalita opticky drsného povrchu, externí osvětlení, mírné otřesy okolí a mnoho dalších. Je proto velmi důležité eliminovat co nejvíce ovlivňujících faktorů a také počítat s určitou chybou měření.

Jak již bylo zmíněno, prvním, demonstračním příkladem byl plochý vzorek s kruhovým otvorem, jež byl zatěžován prostým tahem. Následující část kapitoly zobrazuje geometrii vzorku s oblastí vyhodnocení výsledných hodnot. Poté budou prezentovány výsledky, které nám metoda ESPI umožňuje vyhodnotit.



Obr. 18 Geometrie a oblast vyhodnocení dat vzorku s kruhovým otvorem

Podstatnou výhodou analýzy ESPI je okamžité vyhodnocení a zobrazení pole posunutí, poměrných deformací a také působících napětí. Pro posuzování výsledných hodnot budou použity jen vybrané hodnoty ze sledované oblasti.

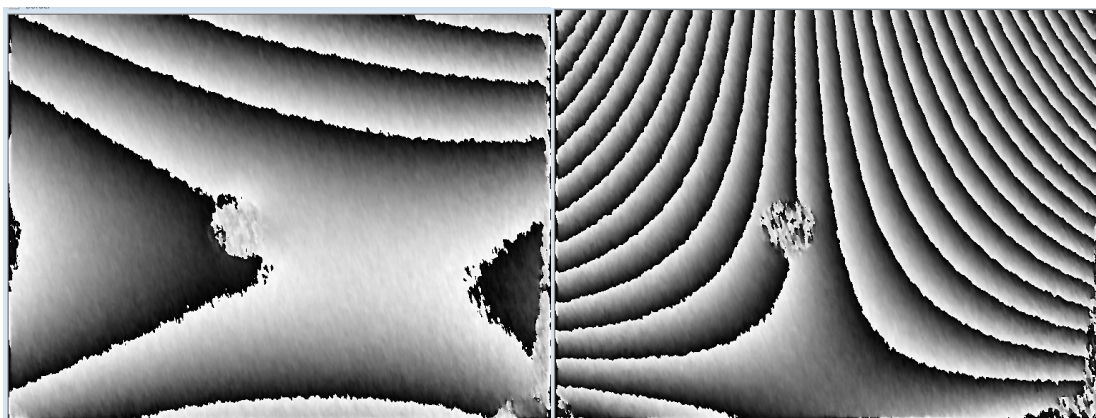
Zkušební vzorek byl namáhán celkovou silou 6000N, přičemž měření bylo provedeno s krokem 500N a 2000N. To znamená, že vzorek je postupně zatěžován v krocích, až je dosaženo požadované maximální hodnoty zatěžující síly. Při dostatečném zatížení a vytvoření požadované hustoty interferenčních pruhů zatěžování zastavíme, čímž se automaticky uloží snímek pro daný krok. Pro dostatečnou kontrolu tvorby pruhů byla vždy volena malá rychlost posuvu příčnicku trhacího stroje, vždy mezi 1-5mm/min.

Číslo kroku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zatěžující síla[N]	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000

Číslo kroku	1	2	3
Zatěžující síla[N]	2000	4000	6000

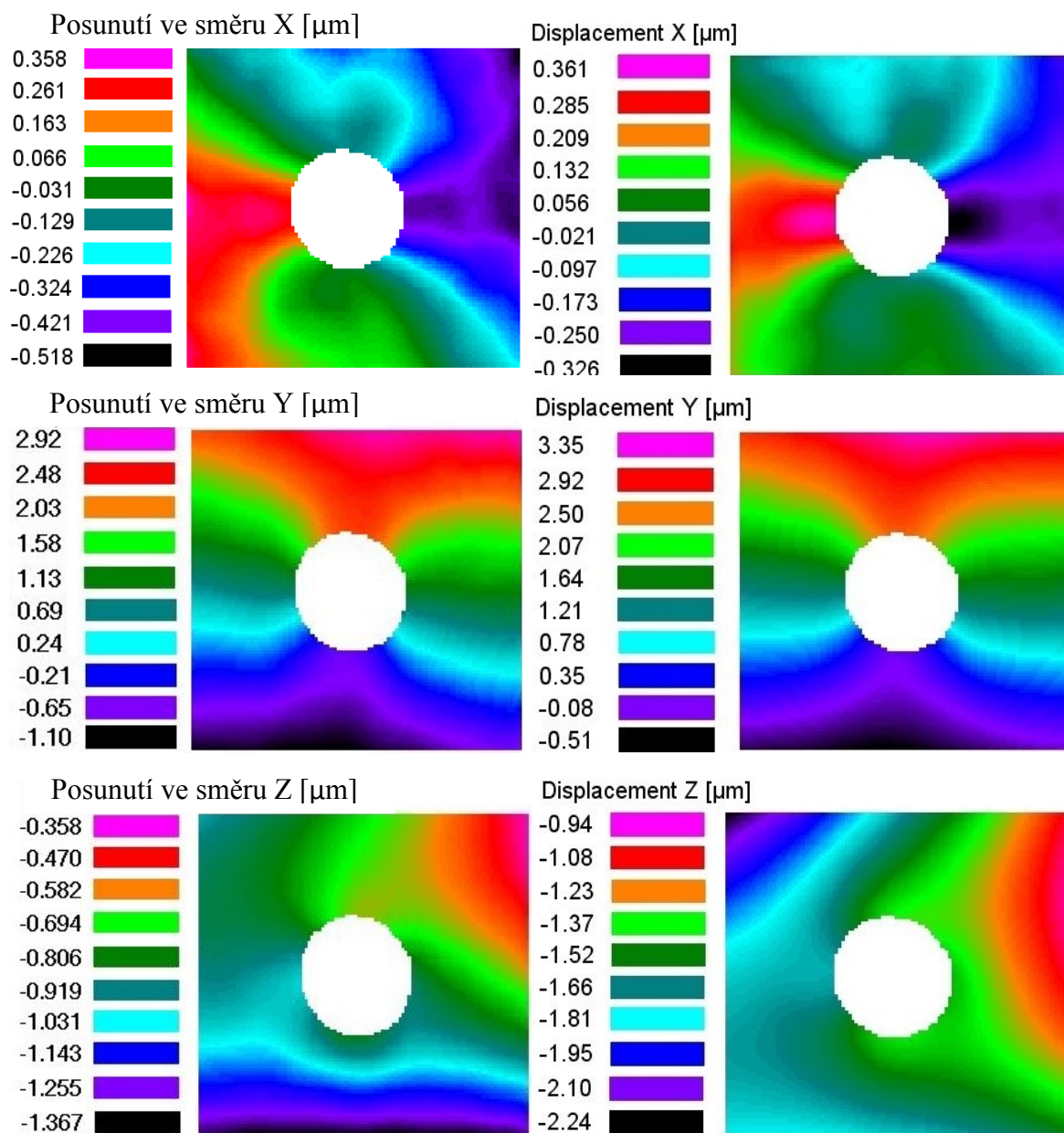
Tab. 3 Hodnoty kroků při zatěžování vzorku

Dále budou prezentovány výsledné hodnoty pro měření s krokem 500N a 2000N, při finálním zatížení 6000N. Bude možno sledovat odlišnost kontur výsledných hodnot při dvou různých krocích a při dodržení stejných pracovních podmínek při měření. V levém sloupci budou prezentovány výsledné hodnoty kroku 500N a v pravém sloupci s krokem 2000N.



Obr. 19 Interferenční pruhů pro různý krok zatížení, vlevo krok 500N, v pravo 2000N

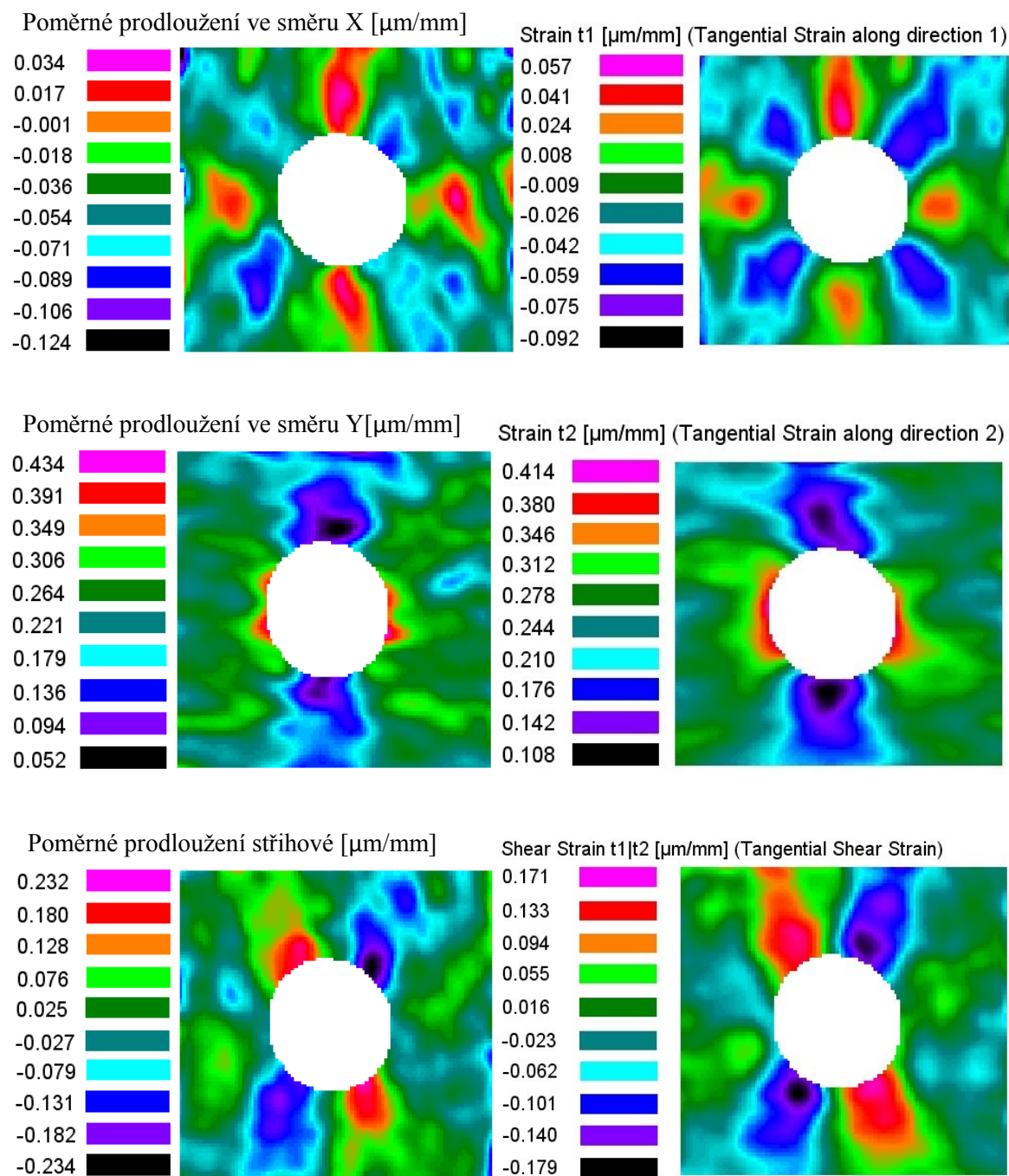
Pro demonstraci pole posunutí v oblasti vyhodnocení vzorku byly použity složky posunutí ve všech směrech, tedy x,y,z (obr.20).



Obr. 20 Výsledné zobrazení kontur posunutí ve všech směrech, levá strana pro krok 500N, pravá strana pro krok 2000N

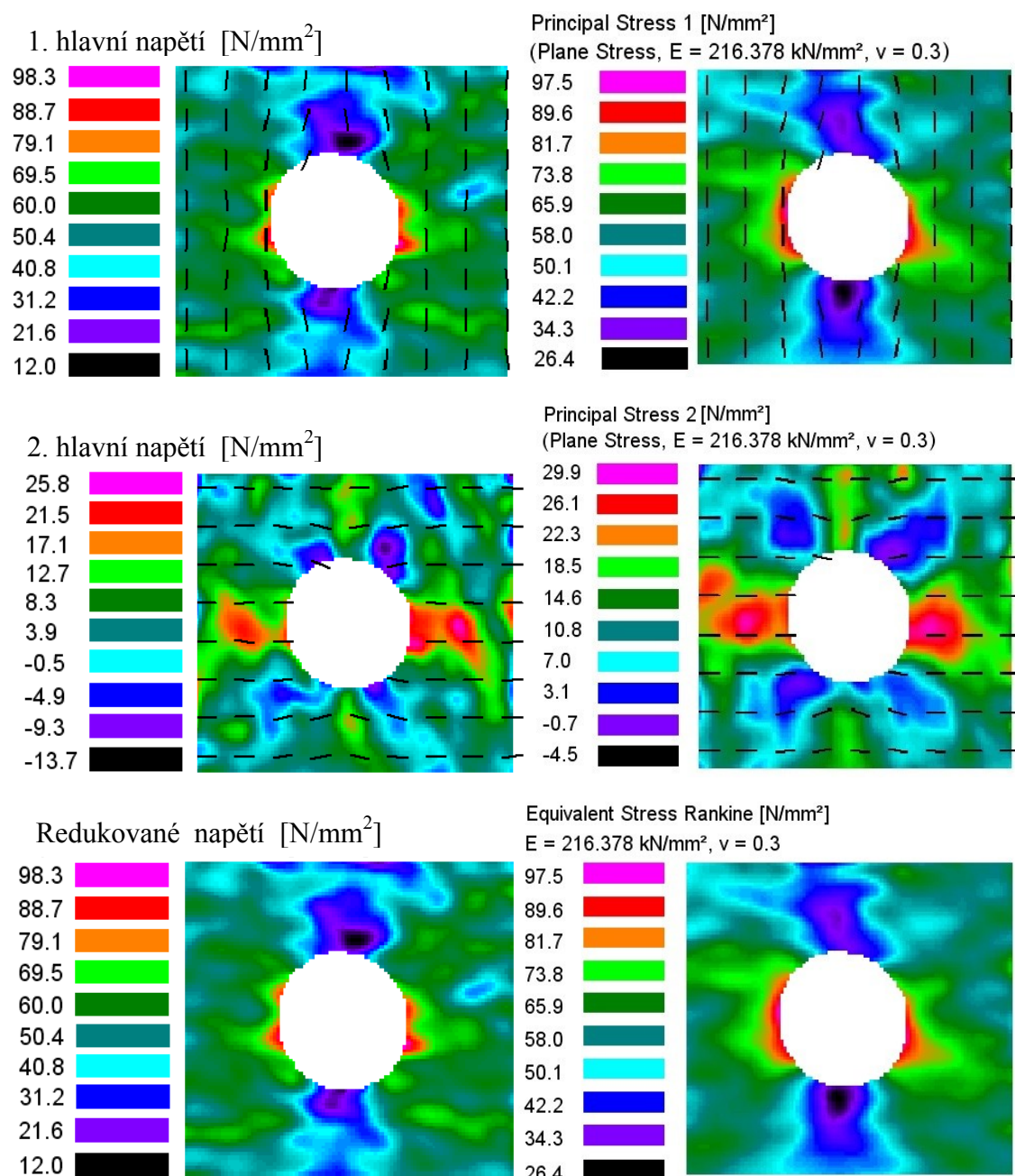


Dalšími prezentujícími výsledky jsou normálové složky poměrné deformace a poměrná smyková deformace, viz Obr.21.



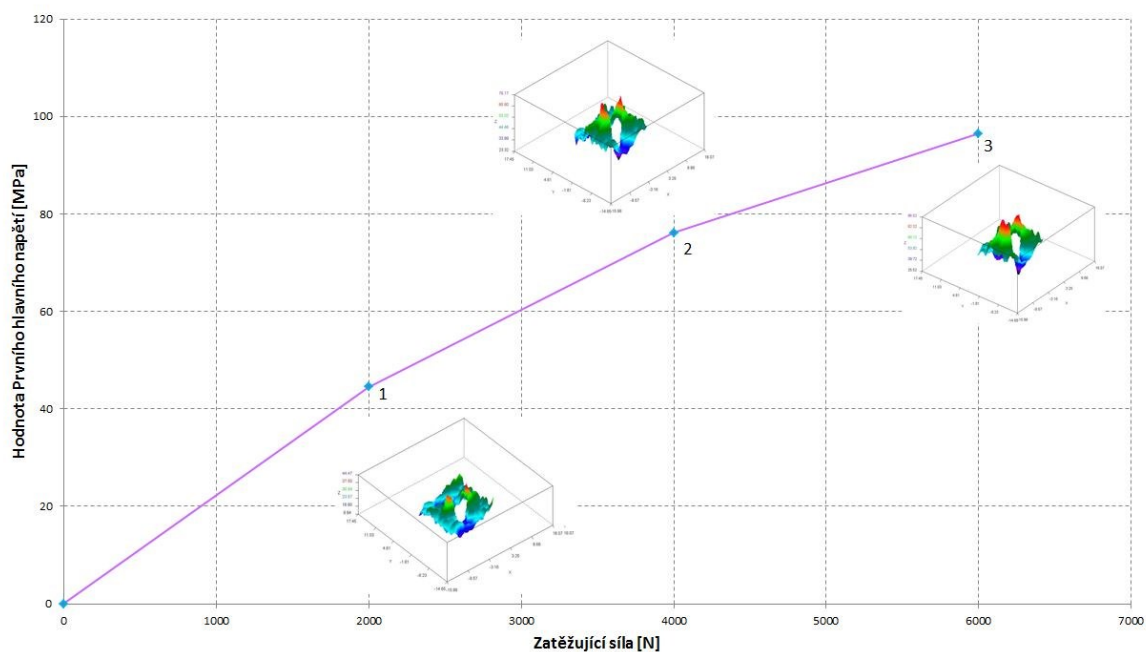
Obr. 21 Výsledné zobrazení kontur poměrných deformací t1,t2 a smykových, levá strana pro krok 500N, pravá strana pro krok 2000N

V neposlední řadě je prezentován průběh hlavních napětí, u nichž jsou zobrazeny taktéž směry vektorů, a redukované napětí v našem případě podle Rankinovy hypotézy.



Obr. 22 Výsledné zobrazení směrů hlavních napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a redukované napětí podle hypotézy Rankinovy, levá strana pro krok 500N, pravá strana pro krok 2000N

Jednou z dalších možností použitého systému ESPI je možnost vykreslení 3D grafů s průběhem výsledných hodnot pro každý zatěžující krok zvlášť. Zde můžeme vidět nárůst velikosti prvního hlavního napětí ve třech krocích po 2000N. Tato možnost může být využita v případě překročení, námi zvolené hraniční hodnoty, a tím zjištění odpovídajícího zatížení k dané hraniční veličině.



Obr. 23 Závislost prvního hlavního napětí od zatěžující síly

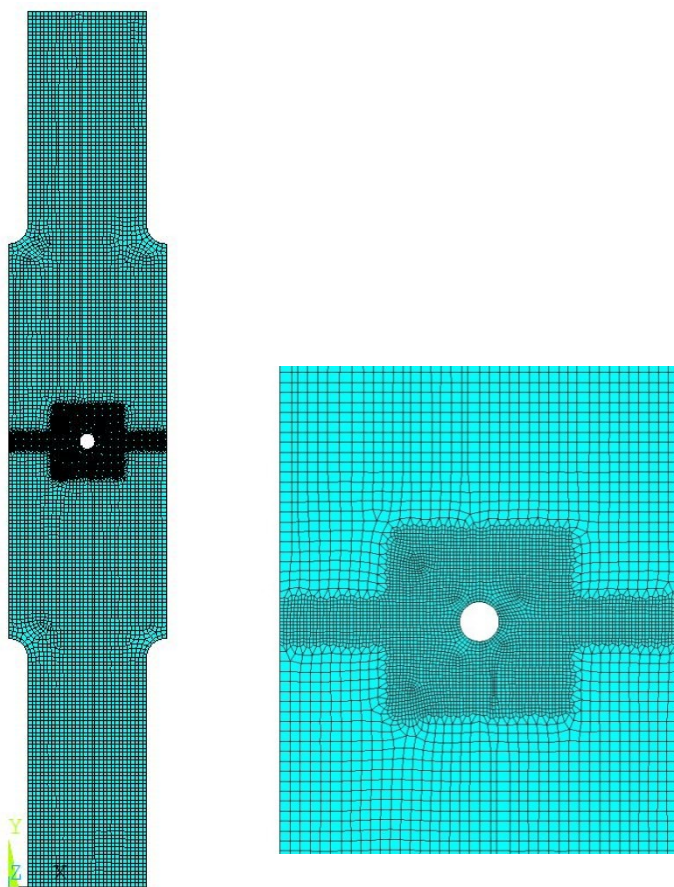


#### 4.1.2. Srovnání s analýzou MKP

V předešlé kapitole byly demonstrovány výsledné hodnoty vyplývající z ESPI analýzy. Jelikož úloha byla pouze demonstrační, ověření správnosti analýzy srovnáním s výsledky z analýzy metody konečných prvků bude provedena pouze u vybraných hodnot. Pro danou úlohu byly zvoleny, nejvíce vyhovují hodnoty, a to posunutí ve směru „y“ a první hlavní napětí.

Jak již bylo naznačeno, oblast vyhodnocení bude ponechána s přidáním grafy hodnot z podélného řezu skrze kruhový otvor zkušebního vzorku.

Pro analýzu MKP byl použitý software ANSYS 14, za použití prvku Plane 42, vhodného pro modelování 2-D úloh. Materiálové vlastnosti a okrajové podmínky byly zvoleny dle reálné zkoušky.



Obr. 24 MKP modelová síť z prvků Plane 42

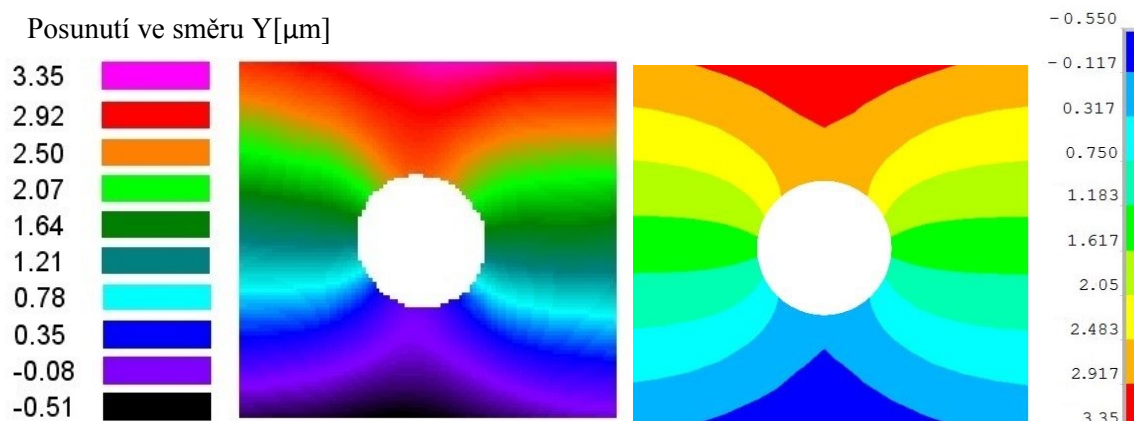
V našem případě bylo použito: 11704 prvků

11414 elementů

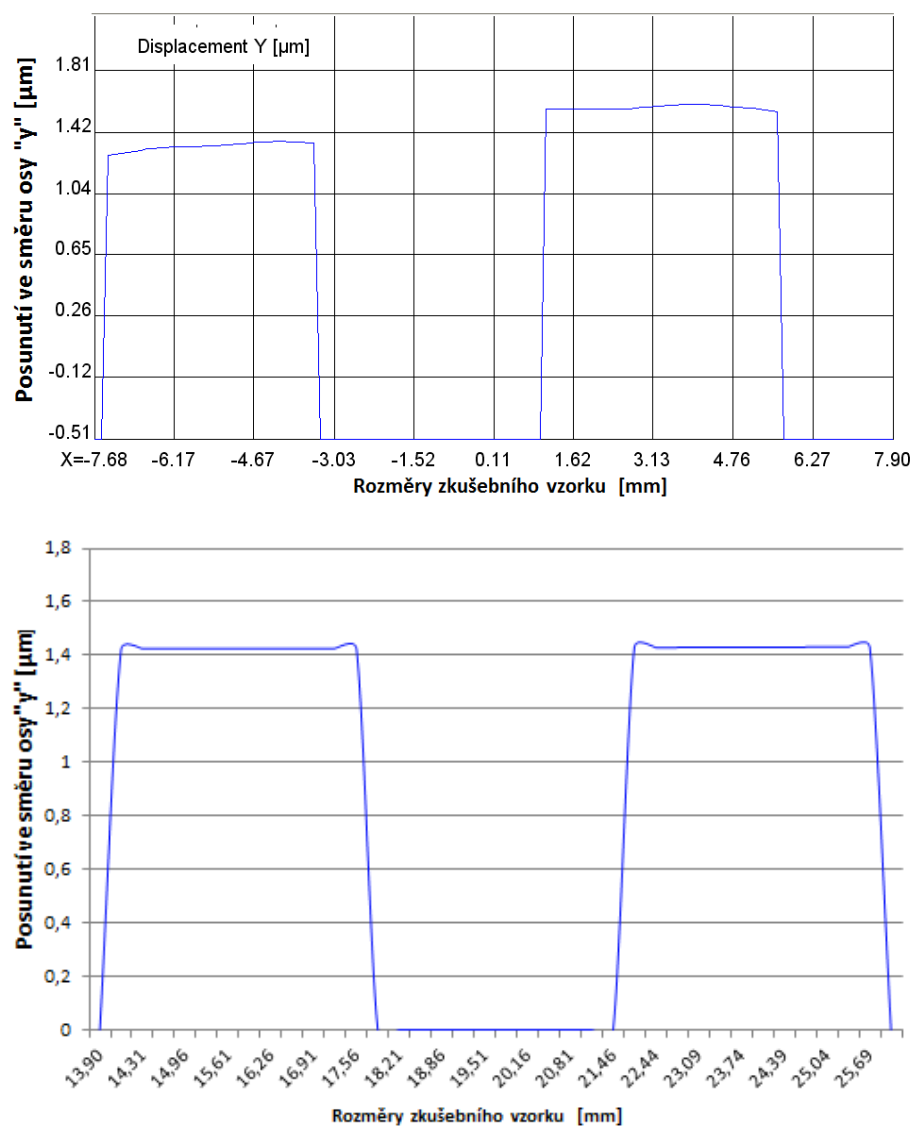
Modul pružnosti v tahu:  $E = 216.37 \cdot 10^5 MPa$

Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$

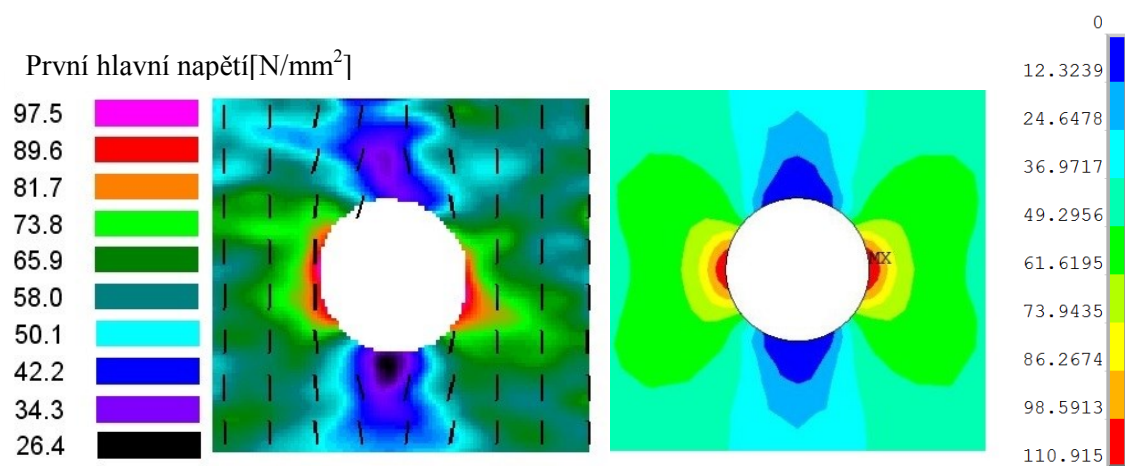
Modul pružnosti v tahu použité oceli byl stanoven ze zkoušky třibodovým ohybem.  
Pro přesnější výsledky bylo provedeno zahuštění sítě v oblasti vyhodnocení dat viz Obr.24.



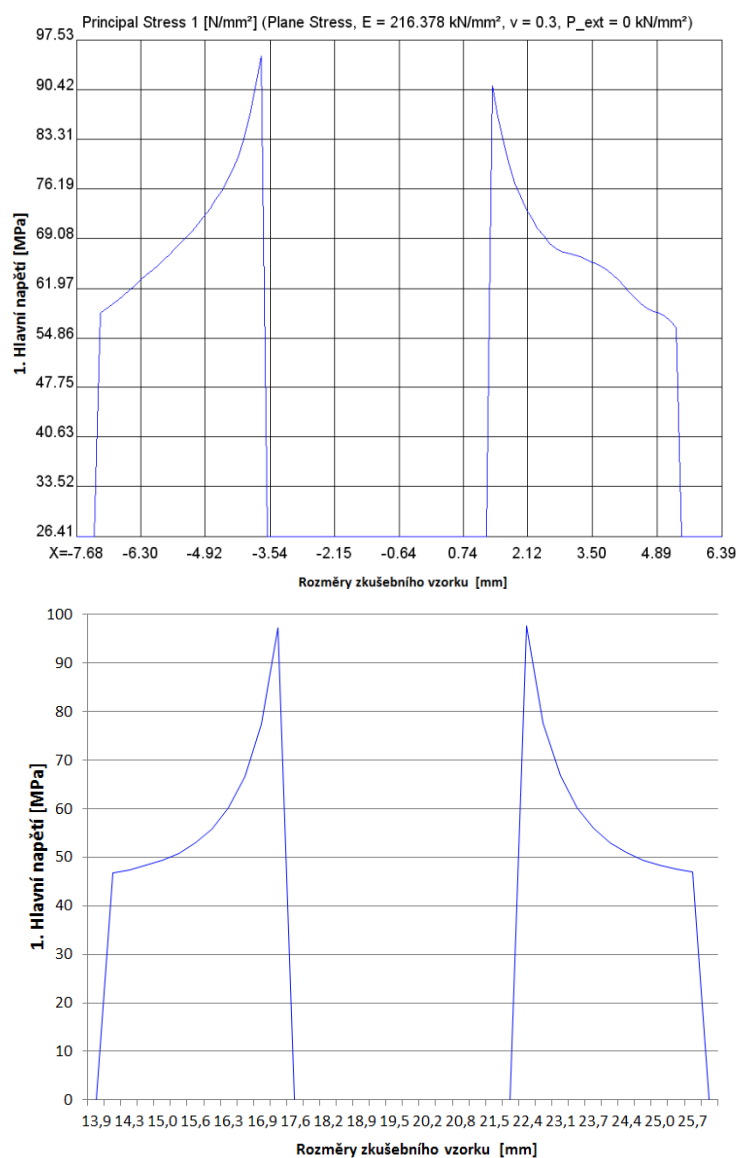
Obr. 25 Grafické srovnání posunutí ve směru "x" (vlevo metoda ESPI, pravá strana MKP analýza)



Obr. 26 Srovnávací průběh posunutí ve směru „Y“ (experiment nahoře, výsledky MKP dole)



Obr. 27 Grafické srovnání prvního hlavního napětí (vlevo metoda ESPI, pravá strana MKP analýza)



Obr. 28 Srovnání průběhu prvního hlavního napětí v příčném řezu (experiment nahoře, výsledky MKP dole)

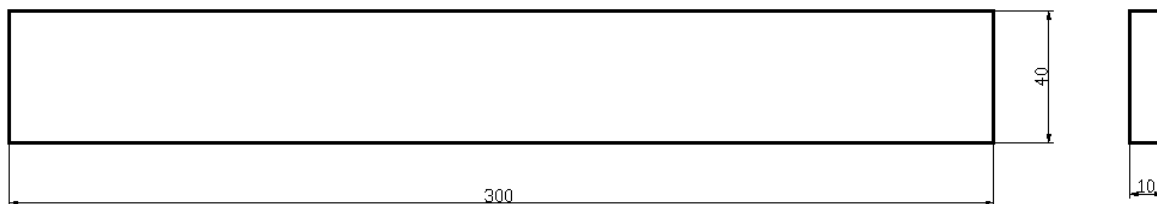
	Posunutí ve směru „y“ [μm]	První hlavní napětí [Mpa]
Metoda ESPI	1,42	97,5
Metoda MKP	1,43	110,9
Chyby měření [%]	0,35	12,82

**Tab. 4 Srovnání výsledků, chyby měření**

Pro srovnání výsledných hodnot byly použity hodnoty z příčného řezu, které jsou zapsány v tabulce Tab.4. Porovnání se bude týkat pouze krajních bodů u kruhového otvoru, tedy špiček napětí. Jelikož u metody ESPI se musí vyřezávat oblast vyhodnocení dat, bude nutné stejné vzdálenosti odhadnout z přístupných dat analýzy.

## 4.2. Úloha 2 – namáhání ohybem

Následné ověření měření přístrojem Q100 bude demonstrováno na případě čtyřbodového ohybu prizmatického nosníku s obdélníkovým průřezem. Vzhledem k vhodné verifikaci úlohy s analytickým řešením bude provedena konfrontace jak s metodou konečných prvků, tak i analytickým výpočtem.



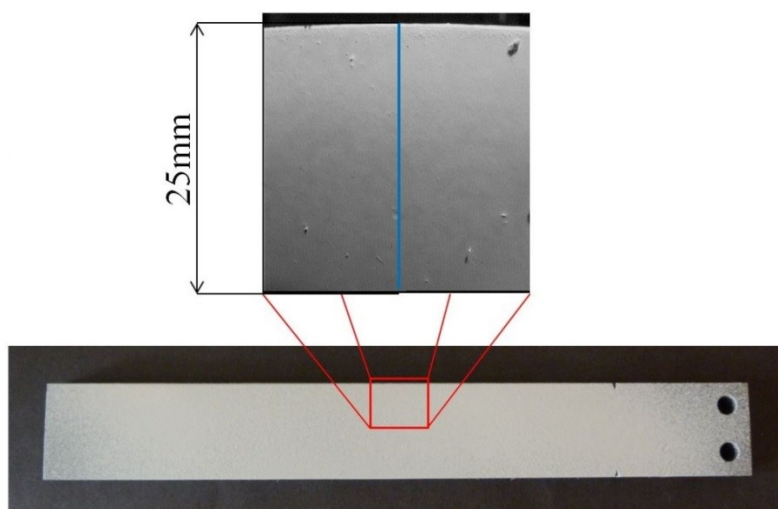
Obr. 29 Vzorek pro 4-bodový ohyb

Zkušební vzorek byl postupně zatěžován krokem přibližně 1000N po finální hranici 5100N viz Tab.5.

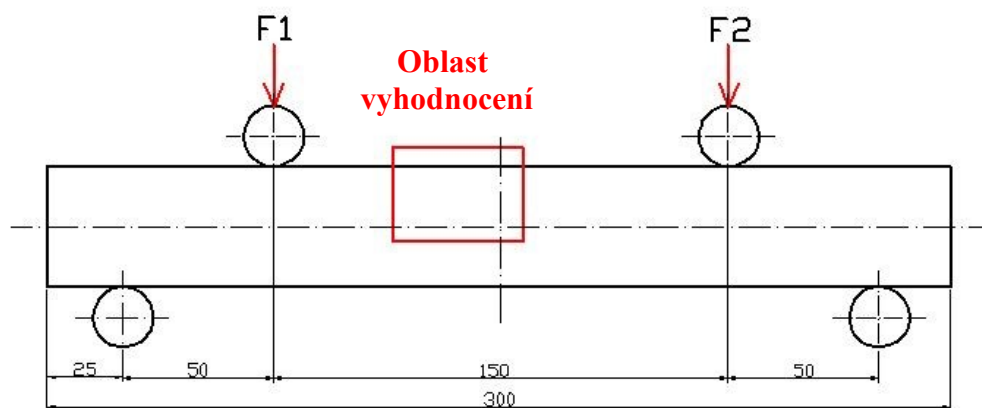
Číslo kroku	1	2	3	4	5
Zatěžující síla [N]	1000	2000	3000	4000	5100

Tab. 5 Kroky zatížení

Pro doplnění nesmí chybět vyhodnocovací oblast analýzy, která je doplněna referenčním obrazem dané oblasti.

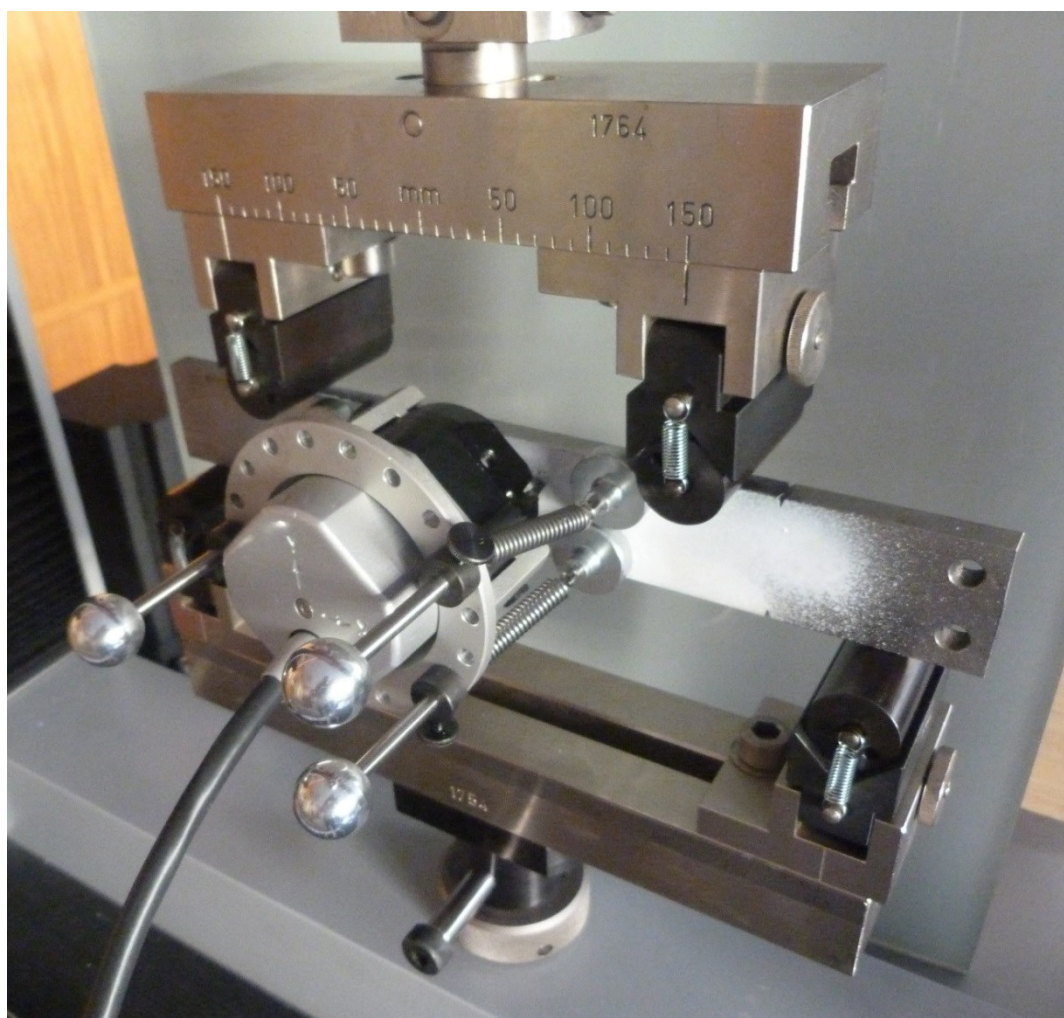


Obr. 30 Oblast vyhodnocení dat



**Obr. 31 Zobrazení oblasti vyhodnocení dat**

Dále je na Obr.32 zobrazen zkušební vzorek připravený ke analýze ESPI, zatěžovaným již zmíněným čtyř-bodovým ohybem.

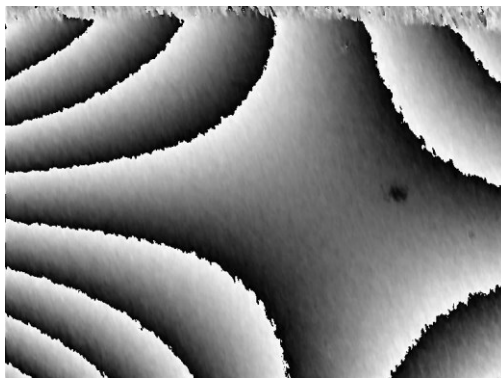


**Obr. 32 Zatěžování vzorku čtyř-bodovým ohybem**

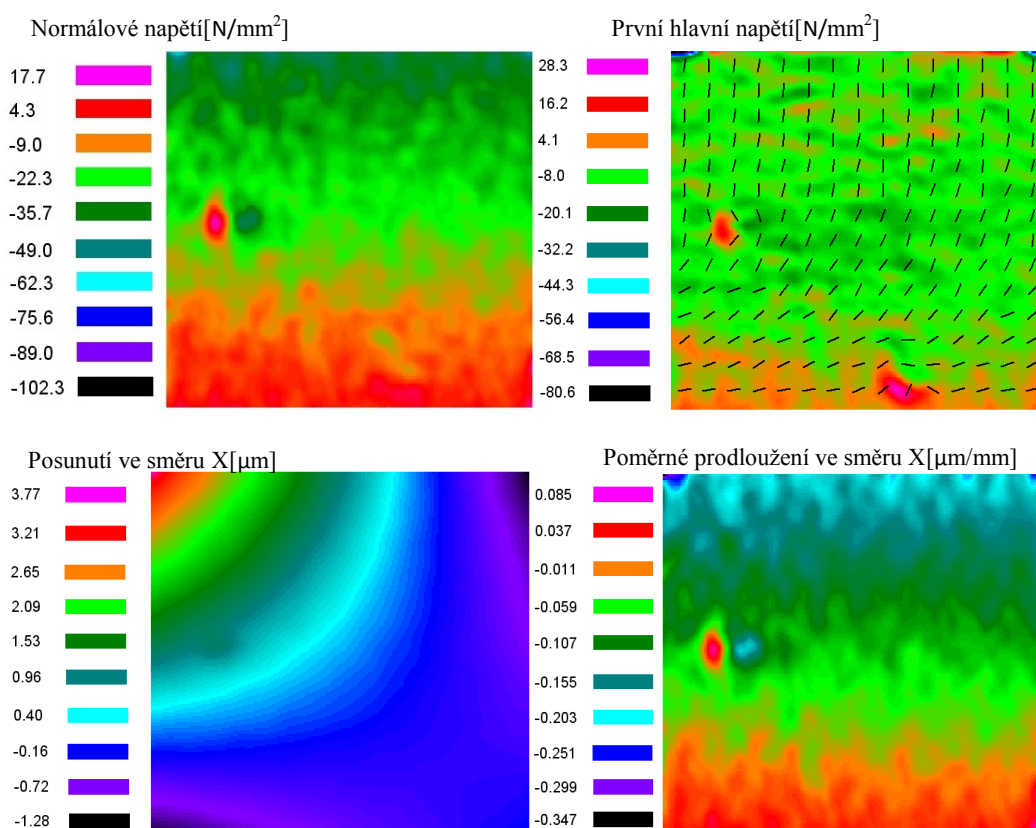


### 4.2.1. Vyhodnocení výsledných hodnot

Obdobně jako u předchozí úlohy budou pro názornost demonstrovány vybrané veličiny a dále jen některé z nich budou zkontrolovány analýzou MKP. Jelikož se jedná o dvojrozměrnou úlohu s ohybovým namáháním, jako vhodné prezentační výsledky budou následující: normálové napětí  $\sigma_x$ , posunutí ve směru „x“ tj. v našem případě v podélném směru, první hlavní napětí a poměrné deformace.



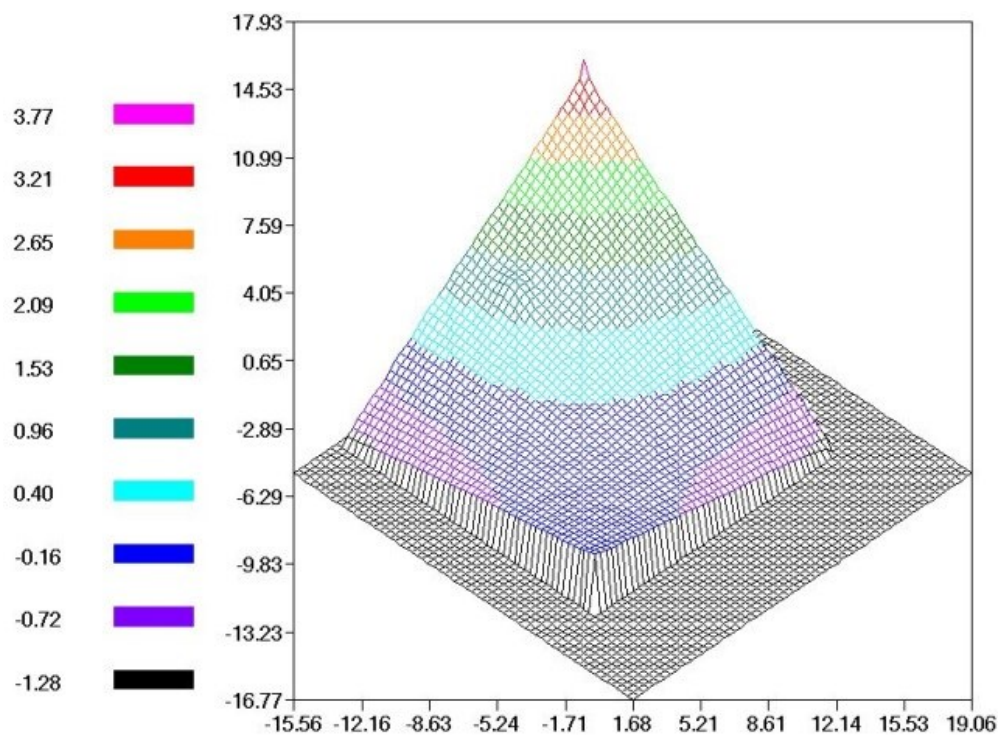
Obr. 33 Interferenční pruhy vzorku namáhaného čtyř-bodovým ohybem



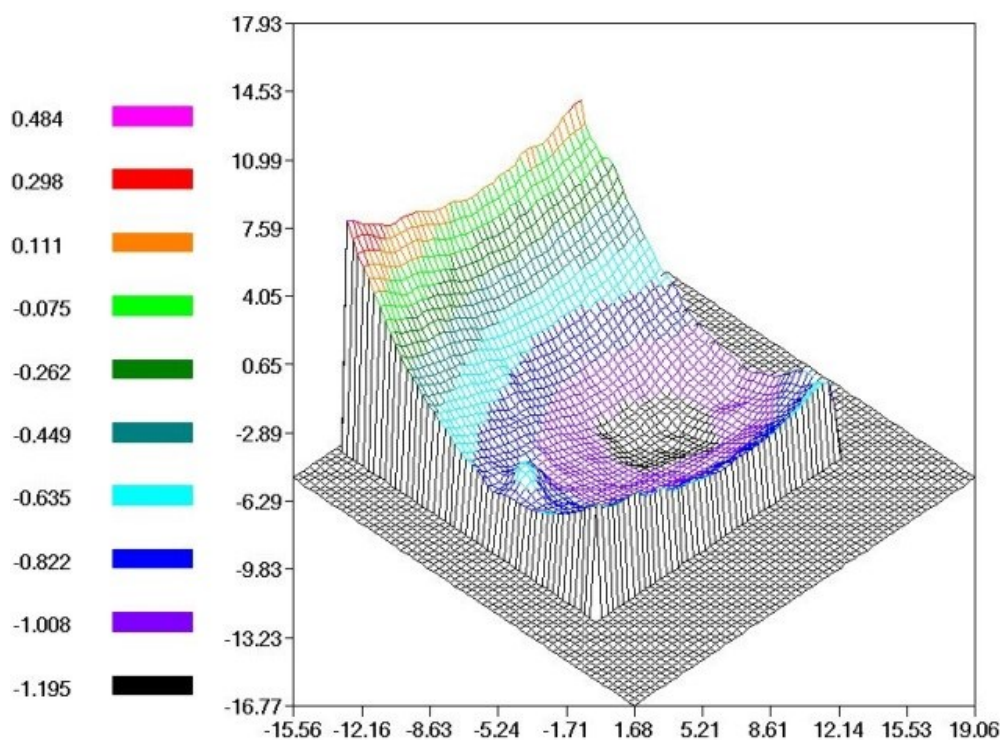
Obr. 34 Zobrazení výsledných kontur jednotlivých veličin z měření metodou ESPI



Další možností je například vykreslení 3D průběhů při zatěžování u jednotlivých kroků. Průběhy budou vykresleny pro posuvy v osách „x,y“.



Obr. 35 3D zobrazení posunutí v ose "x"

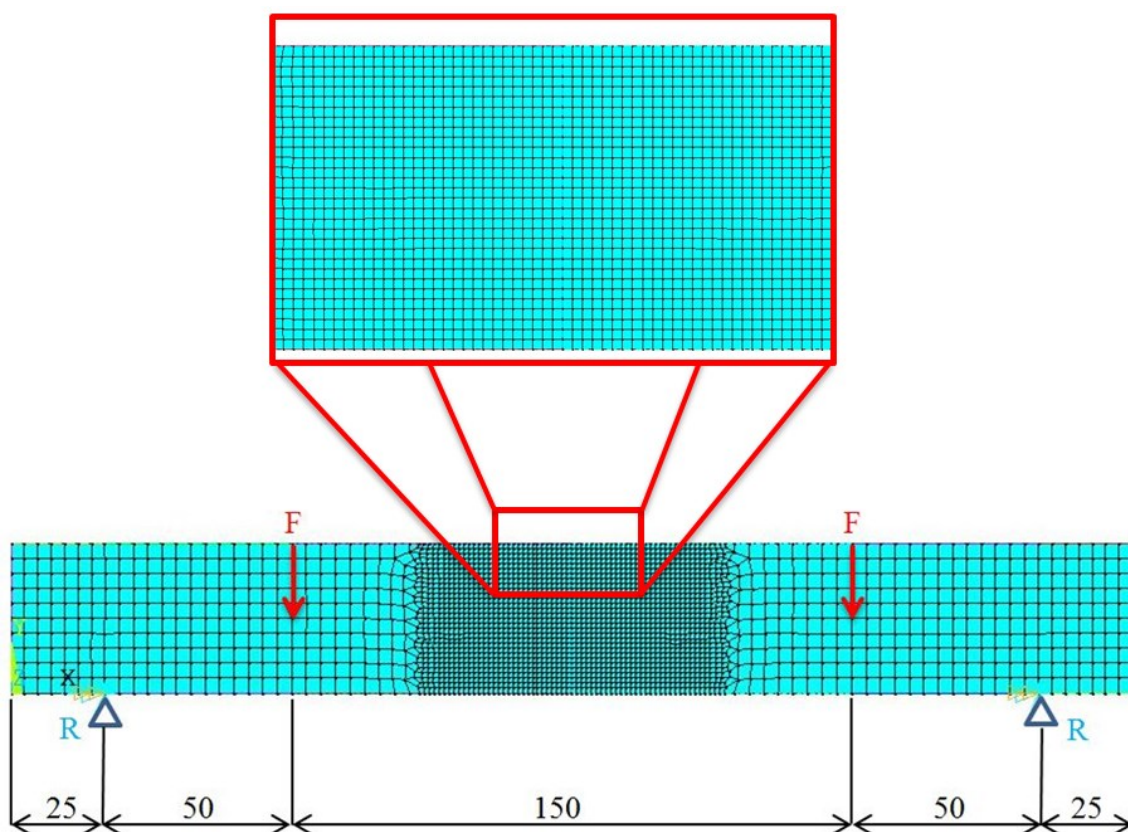


Obr. 36 3D zobrazení posunutí v ose "y"

#### 4.2.2. Srovnání s analýzou MKP

Srovnávacími veličinami budou v tomto případě posunutí ve směru osy „x“ a dále normálové napětí, které bude vyčísleno i analyticky.

Analýza konečných prvků byla provedena za pomoci 2-D prvků Plane 42, vhodné právě pro 2-D úlohy, v prostředí ANSYS 14 APDL. Okrajové podmínky a materiálové vlastnosti byli zadávány opět dle platných reálných hodnot, zobrazené na Obr.37.



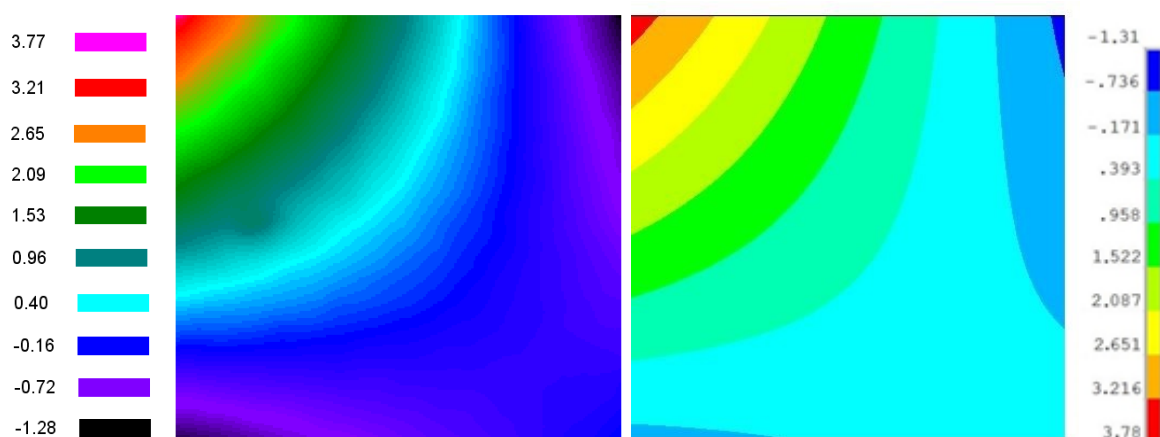
Obr. 37 Konečno-prvková síť modelu ohýbaného vzorku

Počet prvků: 2591

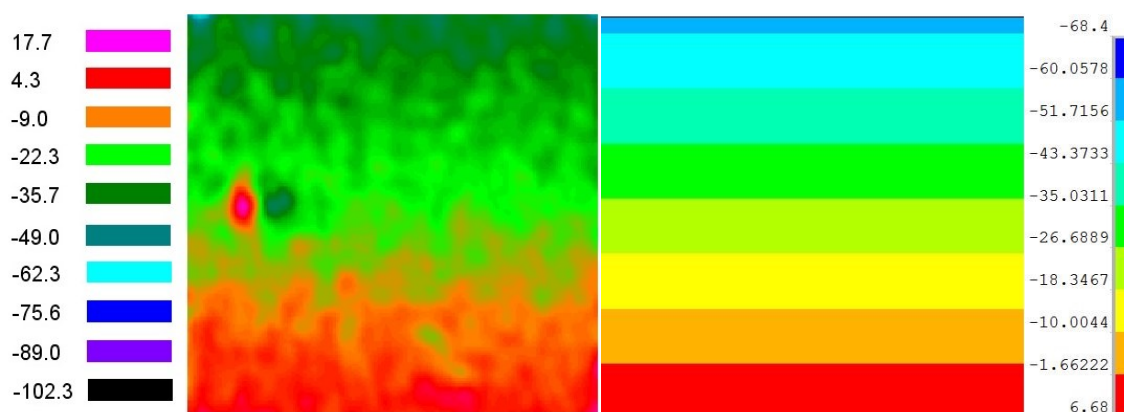
Počet elementů: 2460

Modul pružnosti v tahu:  $E = 210 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$



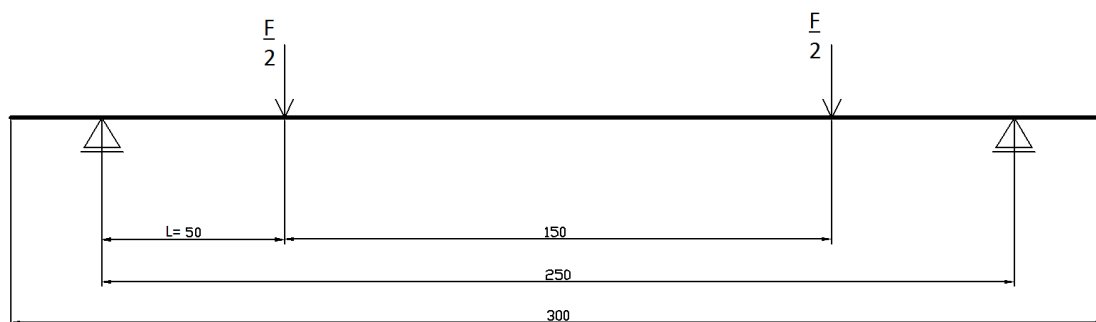
Obr. 38 Grafické srovnání posunutí ve směru "x"(vlevo metoda ESPI, pravá strana MKP analýza)



Obr. 39 Grafické zobrazení normálového napětí (vlevo metoda ESPI, pravá strana MKP analýza)

Na výše uvedených obrázcích, tj. Obr.38,39 lze shlédnout srovnání výsledných kontur dvou rozdílných analýz. Levá strana patří námi vyšetřované metodě ESPI, zatímco výsledné kontury na pravé straně patří metodě konečných prvků.

### 4.2.3. Analytické řešení



Obr. 40 Schéma pro analytický výpočet

Při zatěžování čtyř-bodovým ohybem bude maximální zatěžující síla rozložena mezi dvě stejně velké síly. Výpočtové schéma zachycující rozložení zatěžujících sil a podpor je zobrazeno na Obr. 40.

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{\frac{F}{2} \cdot l}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot \frac{F}{2} \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{3 \cdot 5100 \cdot 50}{10 \cdot 40^2} = \frac{765000}{16000} = 47,8 MPa$$

(4.1)

Kde:

$M_o$ ...je ohybový moment [Nm]

$W_o$ ...je modul průřezu v ohybu [ $m^3$ ]

$F_o$ ...je zatěžující síla [N]

$L_o$ ...je rameno působící síly [m]

$b_o$ ...je šířka zkušební vzorku [m]

$h_o$ ...je výška zkušební vzorku [m]

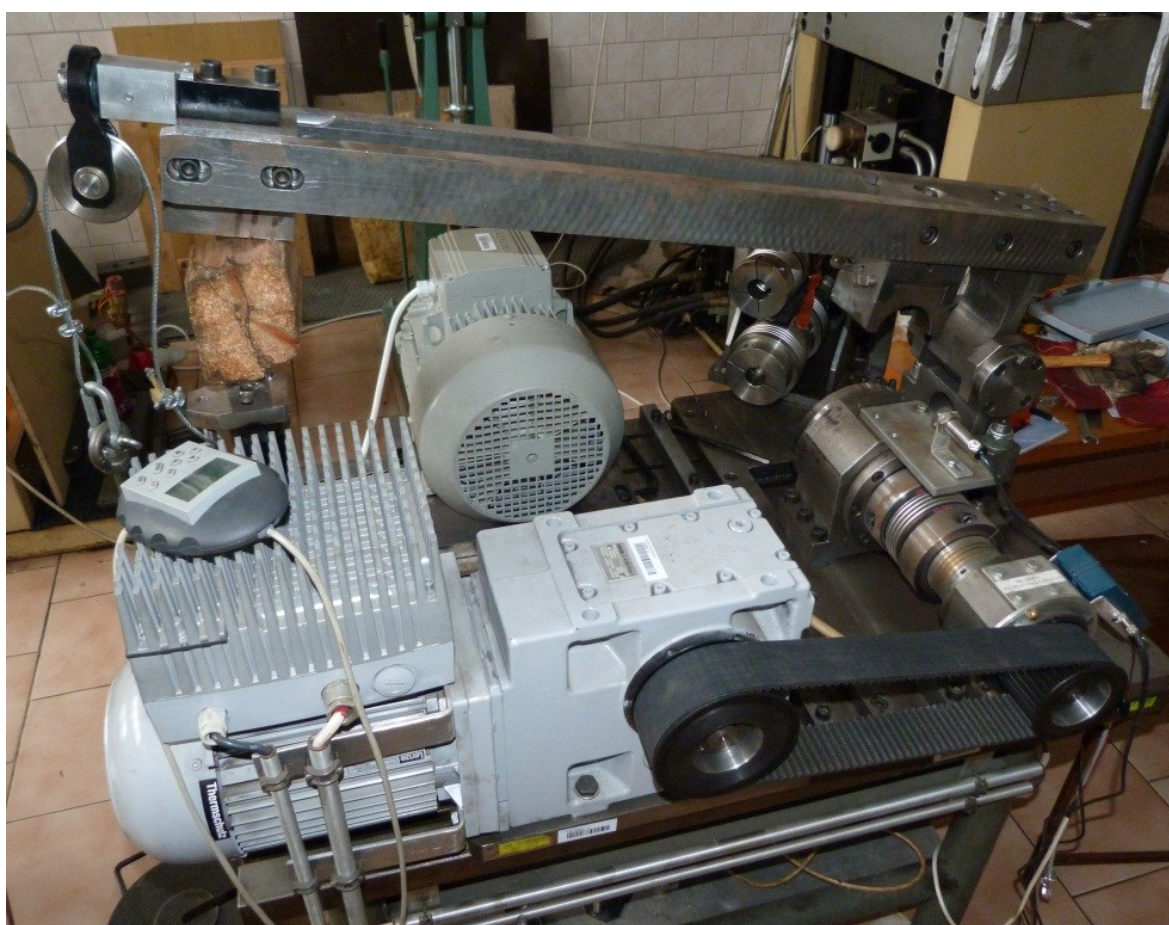


## 5. Aplikace metody ESPI v praxi

### 5.1. Ověření zkušebního stroje

#### 5.1.1. Seznámení s úlohou

Pro praktické využití metody ESPI byla využita Laboratoř kontaktní únavy a kalibrace Katedru pružnosti a pevnosti VŠB-TUO, ve které bylo zkoušce podrobena zkušební zařízení TUORS, simulující namáhání železničních kol při styku s kolejnicí valivým kontaktem. Zkoušce bylo podrobena rameno stolice, jež je při zatížení stolice namáhané na ohyb.



Obr. 41 Zkoumaná měřicí stolice

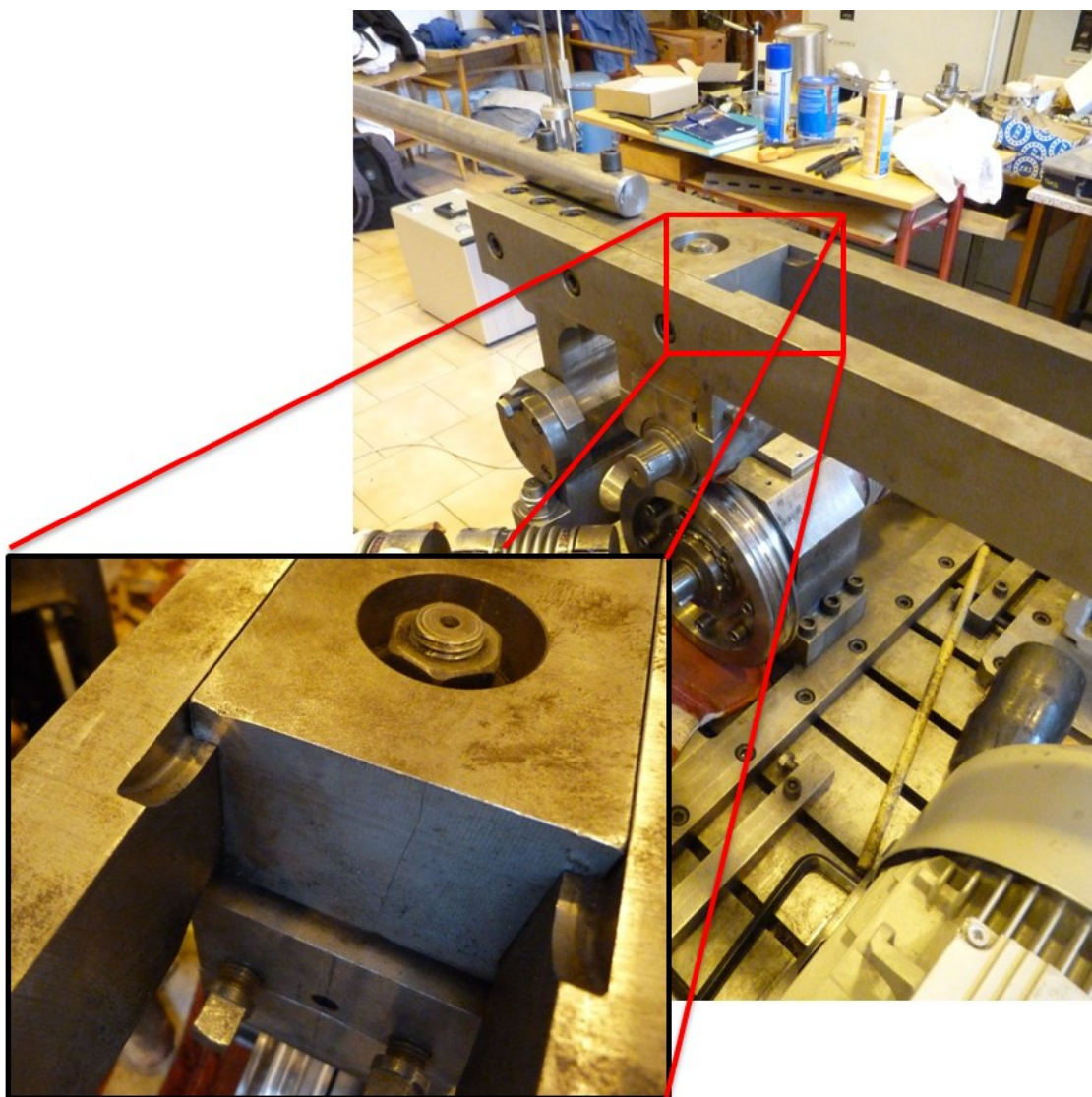
Následující obrázek zobrazuje způsob zatěžování ramene. Zatěžování je dáno umístěním závaží na hák stolice. Toto zatěžování má skokový kvazistatický charakter, jenž při aplikaci metody ESPI nemá negativní účinky.



Obr. 42 Způsob zatěžování ramene

Analýza spočívala v naměření, především redukovaného napětí v oblasti, kde byla předpokládána největší koncentrace napětí. Pro upřesnění jsou tyto oblasti vyznačené na následujícím obrázku. Obr.43.





Obr. 43 Oblast vyhodnocení kritických hodnot napětí

Jelikož se jedná o zkušební stolicí, předpokládá se velká tuhost konstrukce s vyšším koeficientem bezpečnosti. Tyhle předpoklady obvykle zabezpečuje masivní konstrukce, která ovšem nese jisté nevýhody, jež mohou být velké rozměry a vysoká hmotnost. Proto je konstrukčním cílem především zmenšení rozměrů konstrukce, s maximální přípustnou hodnotou výsledného redukovaného napětí v kritických bodech, nepřesahující předpokládanou maximální hodnotu a tím i značné zredukování celkové hmotnosti konstrukce. Z toho důvodu je nutné ověření funkčnosti konstrukce.

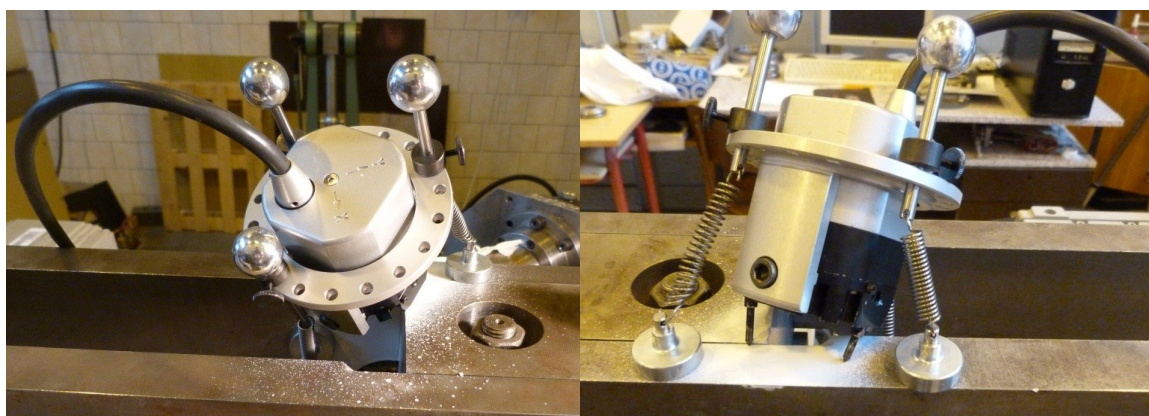
### 5.1.2. Průběh analýzy

Příprava analýzy byla obdobná jako při předchozích, zkušebních analýzách, nyní však s rozdílem typu úlohy. Doposud se byly popsány pouze 2D úlohy, zatímco tvar zkoumané oblasti tuto variantu nedovoluje. Je proto zapotřebí tuto úlohu řešit jako trojrozměrnou.



Obr. 44 Příprava zkoumané oblasti - Nanesení barvy s opticky drsným povrchem

Po nanesení bylo velmi důležité umístit snímač Q100 do správné polohy. I když se při manipulaci vyskytovaly menší problémy, například s nasvícením snímané plochy před samotným měřením, bylo měření poměrně rychlé.



Obr. 45 Umístění snímače Q100 k vyšetřovanému prvku

Zatěžování ramene bylo prováděno dle více popsaného postupu. Hodnoty pro jednotlivé kroky jsou uvedeny v Tab.6.

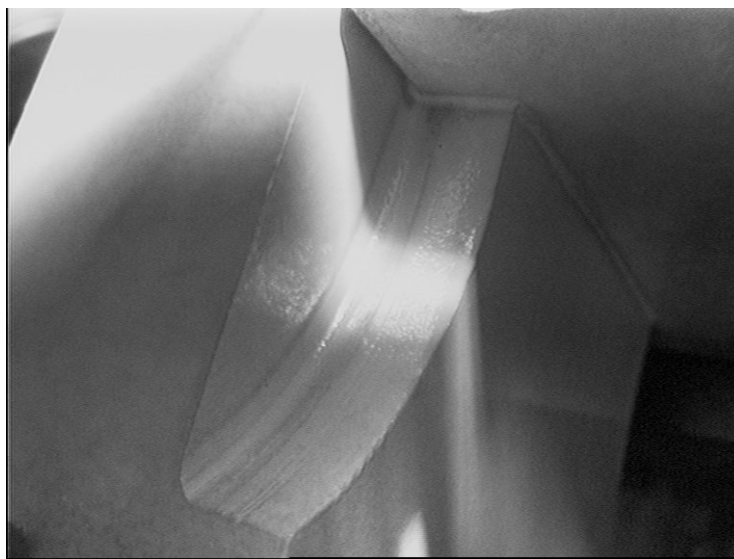


Krok	1	2	3	4
Zatížení [kg]	20	40	60	80

Tab. 6 Tabulka zatěžujících hodnot

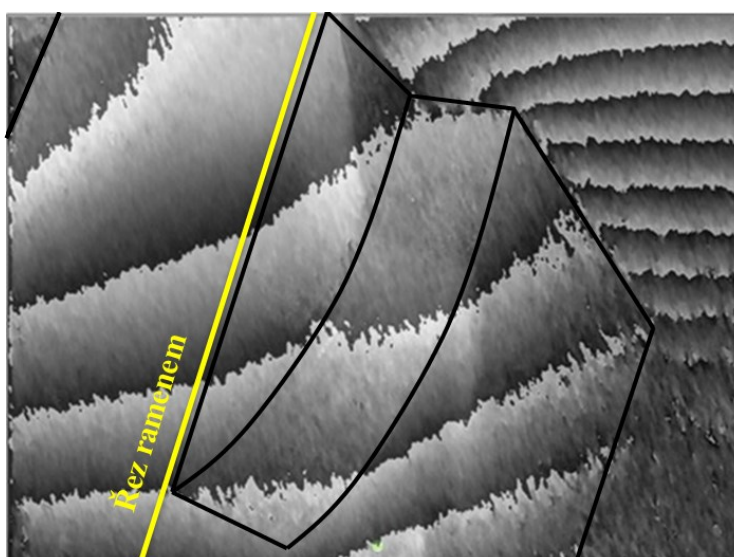
### 5.1.3. Vyhodnocení analýzy

Následný obrázek (Obr.46) zobrazuje referenční snímek kritické oblasti pro vyhodnocení zkoumaných dat.



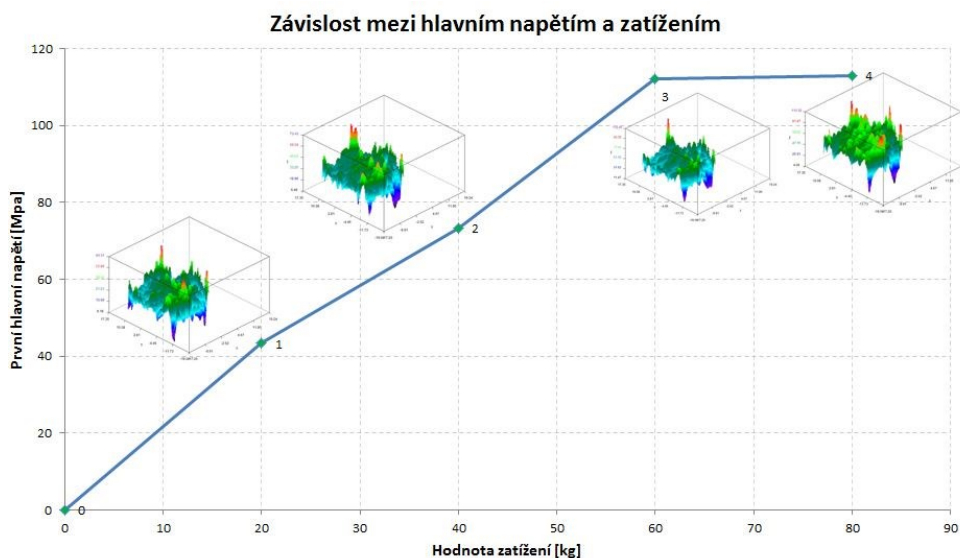
Obr. 46 Zobrazení oblasti pro vyhodnocení dat

Řez viz Obr. 47 pro vykreslení hodnot do grafu, byl po uvážení zvolen na tak, aby procházel povrchem zkoumaného prvku v blízkosti hrany.

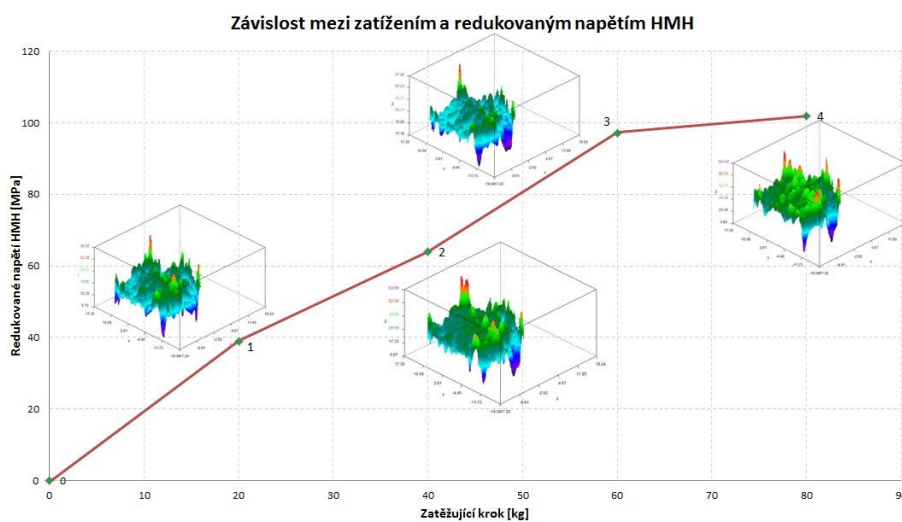


Obr. 47 Interferenční pruhy v oblasti vyhodnocení dat s vyznačeným řezem

Na obrázcích (Obr.48,49) jsou zobrazeny postupné kroky zatěžování vůči vyhodnocujícím veličinám. První graf představuje závislost mezi zatížením a prvním hlavním napětím a druhý zobrazuje závislost mezi zatížením a redukovaným napětím dle HMM hypotézy.

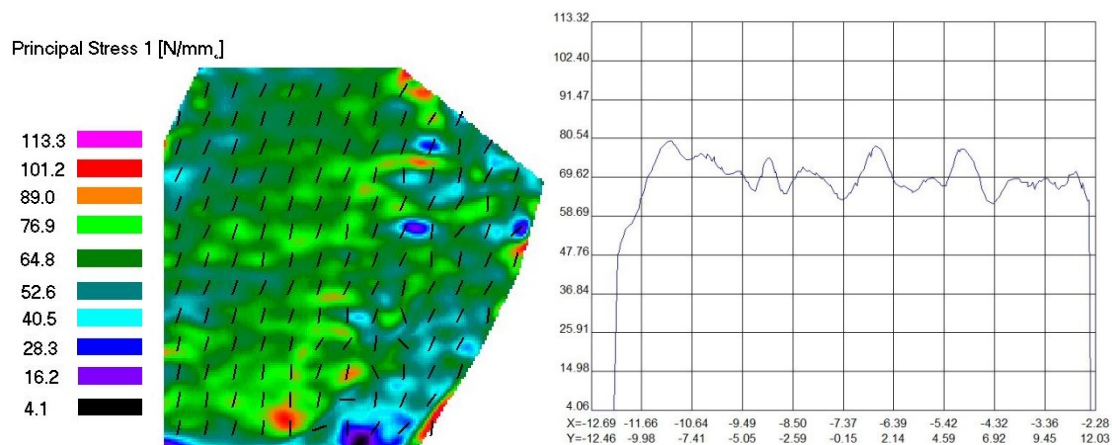


Obr. 48 Závislost mezi prvním hlavním napětím a zatížením

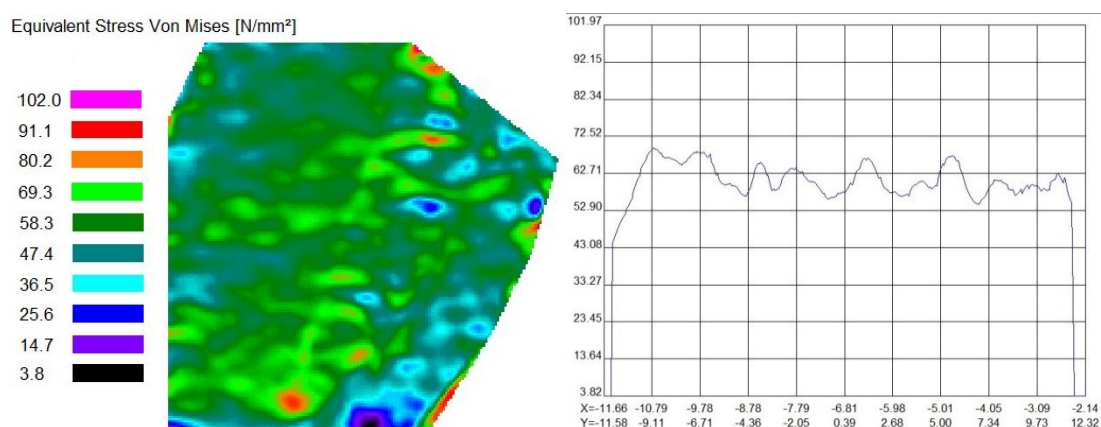


Obr. 49 Závislost mezi redukovaným napětím HMM a zatížením

Pro upřesnění jsou dále zobrazeny (Obr.50,51) pouze výsledné kontury analýzy pro první hlavní napětí a redukované dle HMM hypotézy.



Obr. 50 Napětí ve směru Y, tj kolmé na směr řezu



Obr. 51 Redukované napětí podle hypotézy Von Mises

Jak lze z obrázků a grafů (Obr. 50,51) vyčíst, průměrná hodnota normálového i redukovaného napětí se pohybuje kolem hodnoty 70MPa. Náš předpoklad o maximální výši a tuhosti konstrukce byl správný, čímž hodnotíme konstrukci za dostatečně únosnou a tuhou. Jinými slovy vyhovující pro daný typ zkoušek. Můžeme si také povšimnout nepatrné špičky jak u posuvu, tak i u napětí. Tento jev je dán nežádoucím šumem při měření, jež způsobuje například špatné osvětlení či vnější vlivy.

S porovnáním s mezí kluzu pro konstrukční ocel 11 523 Re= 333MPa[7] značně převyšuje tuto hodnotu, a to s 5 násobnou bezpečností.

## **5.2. Analýza naklápěcího nosníku průmyslové pračky**

### **5.2.1. Seznámení s úlohou**

Pro následující aplikaci metody ESPI byla využita možnost provedení měření přímo v praxi. Jednalo se o napět'ovou a deformační analýzu naklápěcího nosníku (viz Obr.53) průmyslové pračky (Obr. 52) vyráběné společností Primus CE.

Společnost Primus, působící na trhu od roku 1911 v Belgii, jako výrobce domácích praček a myček. Avšak od roku 1970 se zaměřila na výrobu profesionální, komerční prádelenské techniky a nyní pokrývá značnou část tohoto odvětví.

Daná zkouška byla prováděna na průmyslové pračce řady FS, modelu 40, u kterého je možnost vyklápění vypraného, mokrého prádla z bubnu pračky.



**Obr. 52 Průmyslová pračka Primus FS 40 – [6]**

### **5.2.2. Základní technické parametry**

Mezi základní charakteristické vlastnosti výrobku spadají tyto přednosti:

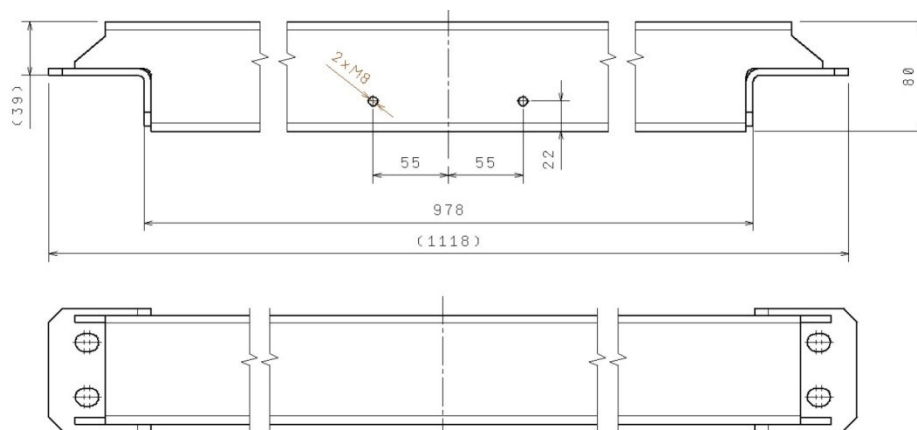
- Graphitronic<sup>®</sup> programátor – např. dálkové ovládání
- Velký dveřní otvor (φ54cm)
- Perforovaná zvedací žebra Powerwash<sup>®</sup>
- Standardně připojení na tekuté prací prostředky

Kapacita prádla	40kg
Objem bubny	400l
Průměr bubny	914mm
Čistá hmotnost	1560kg
Hmotnost včetně prádla	1600kg
Základní rozměry ( $V \times \mathring{S} \times H$ )	1905 × 1195 × 1430 mm

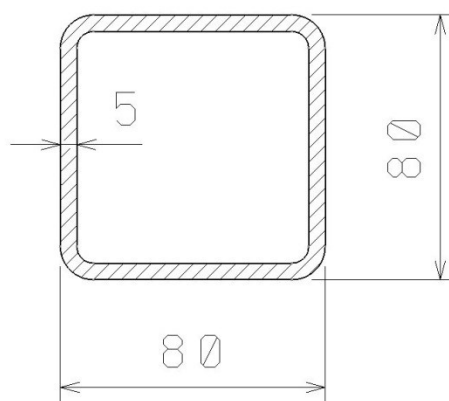
Tab. 7 Základní technické vlastnosti pračky Primus FS40 – [6]

### 5.2.3. Problematika úlohy

Jak již bylo zmíněno, oblastí analýzy byl naklápěcí nosník pračky řady FS40.



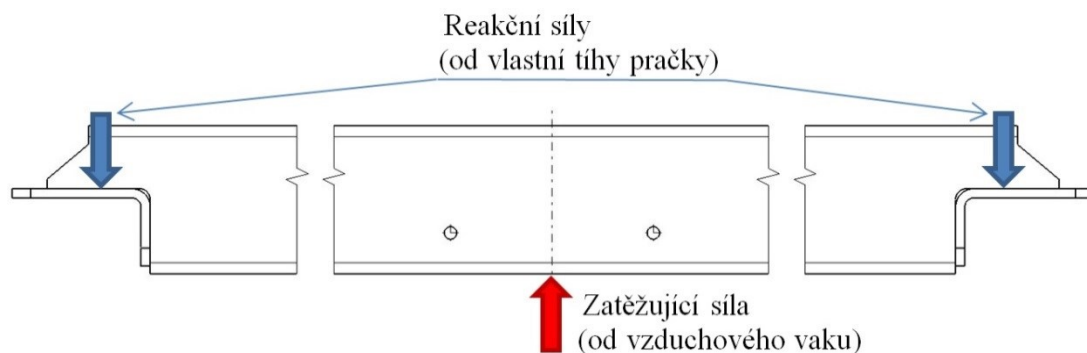
Obr. 53 Základní rozměry namáhaného nosníku



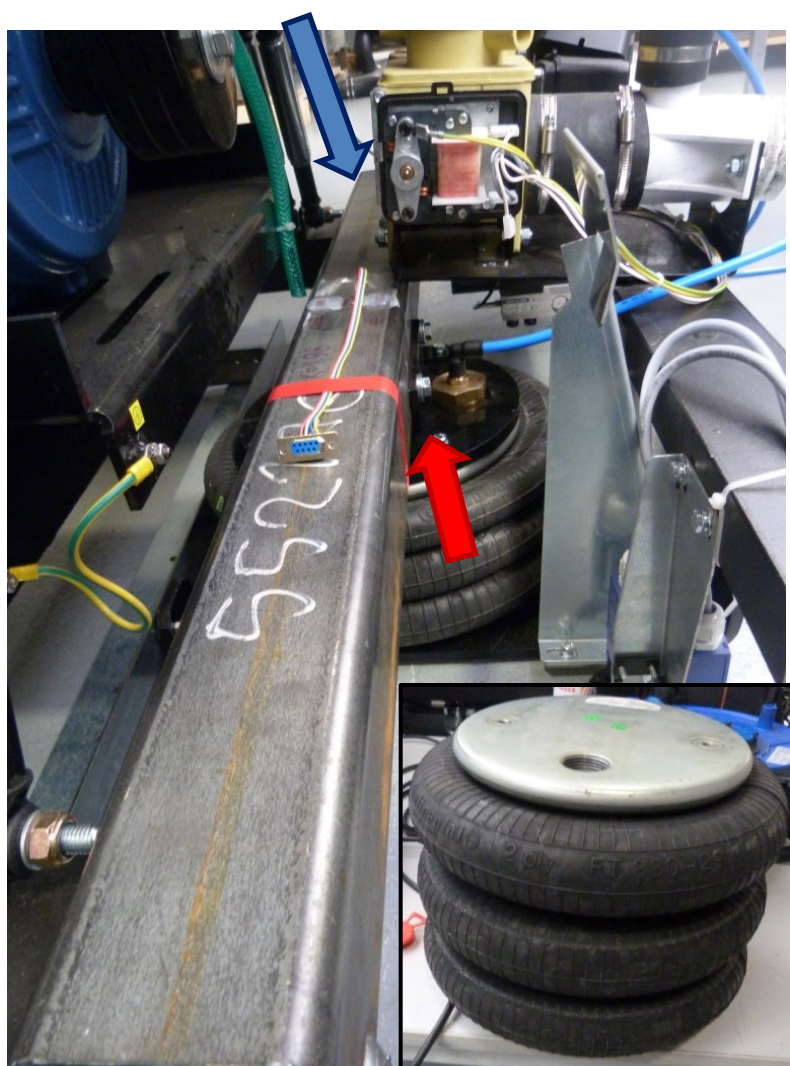
Obr. 54 Řez nosníku



K zatěžování nosníku docházelo při nakládění pračky za pomoci vzduchového vaku, ovládaného přímo na ovládacím pultu pračky. Následující obrázek, (Obr. 55) zobrazuje způsob zatěžování nosníku. Jedná se o sílu vyvinutou vzduchovým vakem a naopak reakční síly od hmotnosti pračky, včetně naplněného bubnu prádlem – 40kg.

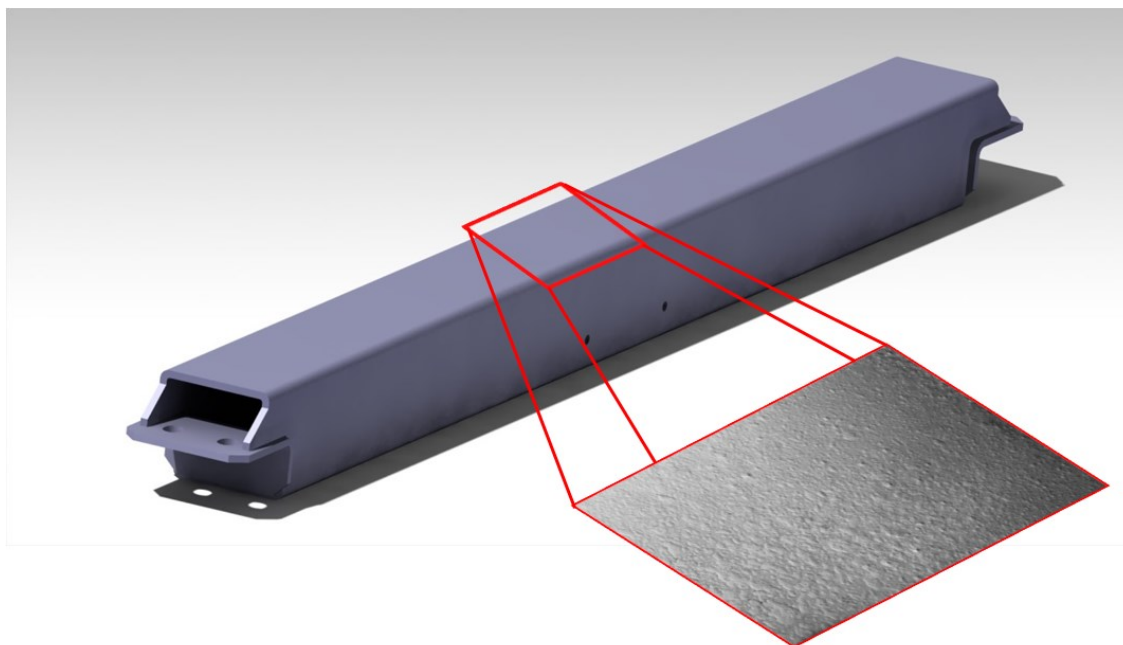


Obr. 55 Zatížení nosníku

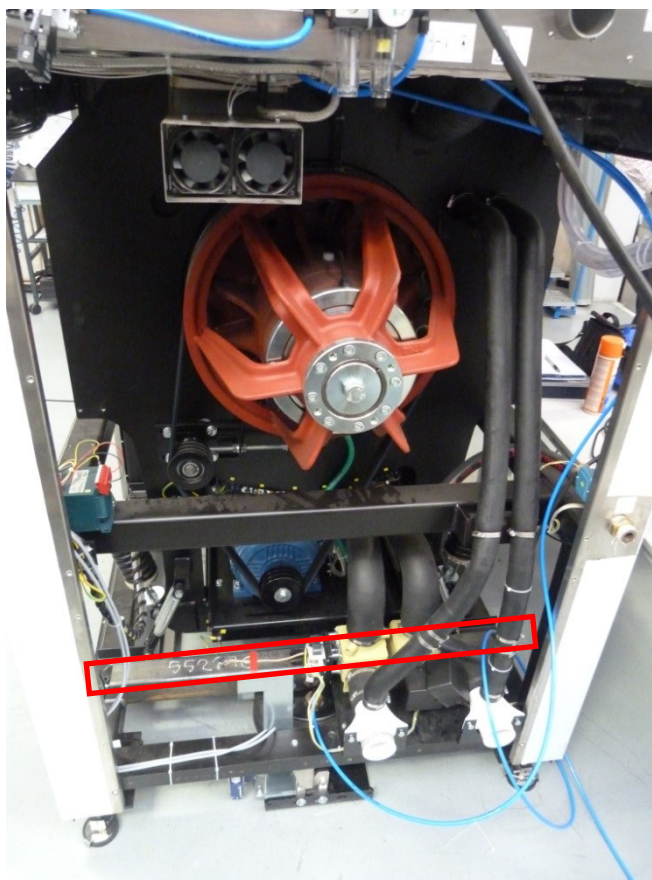


Obr. 56 Namáhaný nosník s vzduchovým vakem

Zkoumaná oblast byla zvolena na základě požadavku daném pracovníky firmy Primus, s předpokladem na maximální ohybové napětí a maximální posunutí nosníku.



**Obr. 57** Oblast analýzy pro vyhodnocení dat

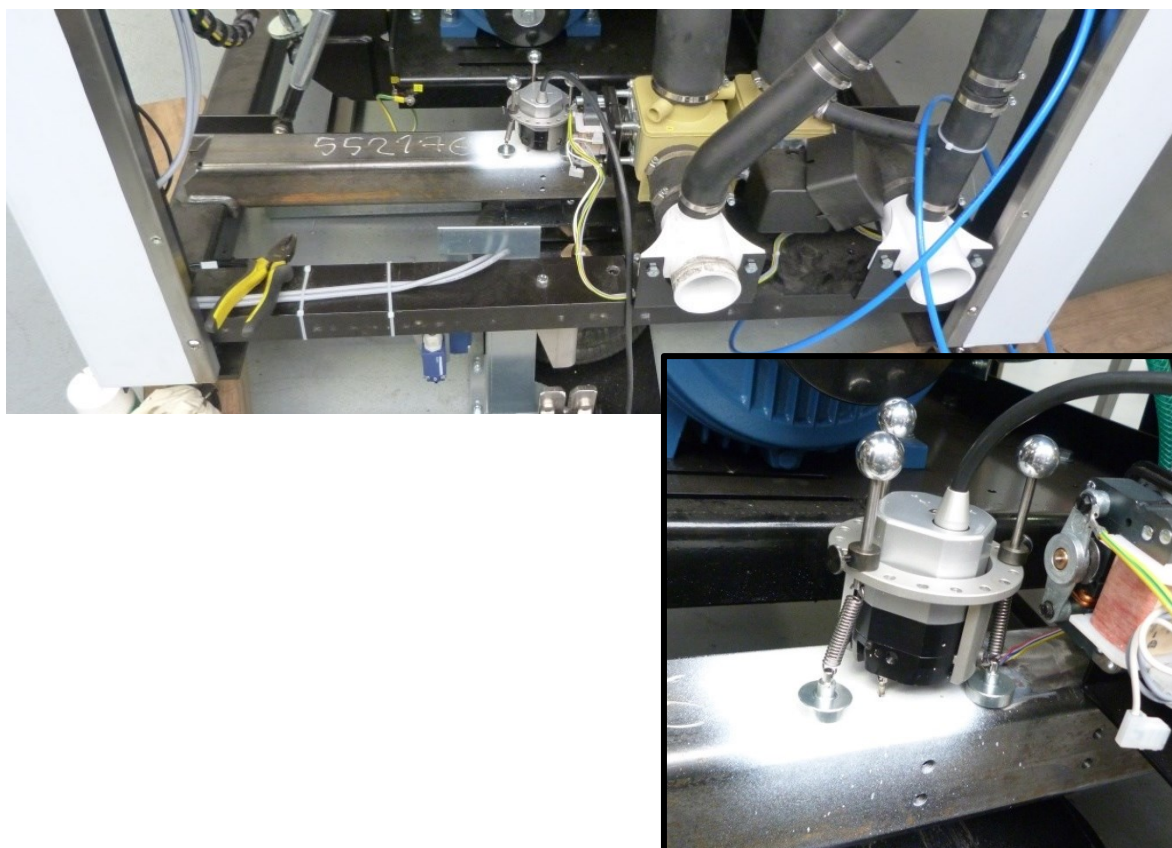


**Obr. 58** Umístění nosníku



#### 5.2.4. Průběh analýzy

Úloha bude opět řešena jako 2D. Po správném umístění snímací hlavy systému Q100, bylo nutné zvolit krok zatěžování. Vzhledem ke skutečnosti byl zvolen jako druh kroku úhel natočení pračky při jejím naklápění.

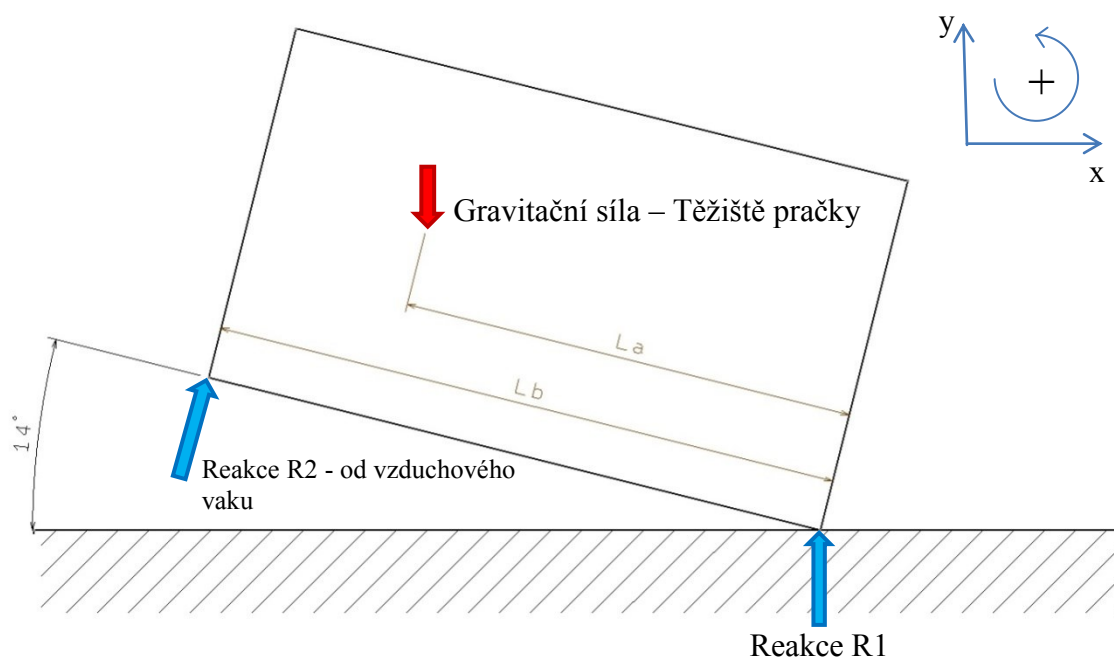


Obr. 59 Umístění snímací hlavy systému Q100

Rozpětí náklonu činí ( $0^\circ$  -  $14,3^\circ$ ), které bylo rozděleno do kroků dle následující tabulky. Zatěžující hodnoty byly posléze přepočítány dle následujícího vztahu:

Krok:	1.	2.	3.	4.	5
Úhel natočení:	$0^\circ$	$0.8^\circ$	$2.9^\circ$	$10.2^\circ$	$14.3^\circ$

Tab. 8 Tabulka zatěžujících kroků



Obr. 60 Náčrt výpočtu reakce R2 ve styku vzduchového vaku s nosníkem

Z poskytnutých hodnot reakcí v poloze  $\alpha=0$ , tj. těsně před nakláněním objektu, jsme dopočítali zbylé neznámé.

$$\begin{array}{ll} \text{Reakce} & R2_{(\alpha=0)} = 8005N \\ & G = 15696N \\ & Lb = 1017mm \end{array} \quad \begin{array}{l} R1 = ? \\ La = ? \end{array}$$

Rovnice rovnováhy ( $\alpha=0$ ):

$$\sum Fx = 0, \quad R1 + R2 - G = 0 \quad (5.1)$$

$$\sum M = 0, \quad G \cdot La' - R2 \cdot Lb' = 0 \quad (5.2)$$

$$La' = La \cdot \cos \alpha \quad (5.3)$$

$$Lb' = Lb \cdot \cos \alpha \quad (5.4)$$

$$R1 = G - R2 = 15696 - 8005 = 7691N$$

$$La = \frac{R2 \cdot Lb}{G} = \frac{8005 \cdot 1017}{15696} = 518,6mm$$

Jelikož reakce R2 po zatížení nakláněné pračky, zůstává stále kolmá k zatěžující ploše nosníku, bude další úprava následující  $R2 \Rightarrow R2y$ . Nyní hodnotu R2 označíme jako neznámou. Ovšem víme, že vertikální složka síly R2y bude ve všech polohách stejná, tudíž nárůst, resp. pokles výsledných hodnot bude především od horizontální složky síly R2x.

S narůstajícím náklonem pračky, ovšem jen při malých hodnotách úhlu  $\alpha$  bude složka  $R_{2x}$  narůstat dle jednoduchého uvažování.

$$\sum M = 0, \quad G \cdot L_a \cdot \cos\alpha - R_{2y} \cdot L_b \cdot \cos\varphi\alpha - R_{2x} \cdot L_b \cdot \sin\alpha = 0$$

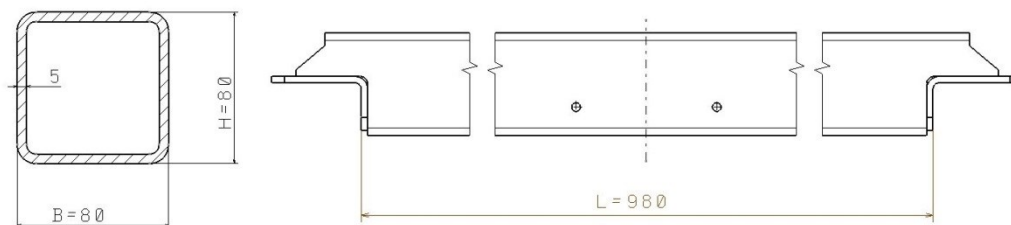
$$R_{2x} = \frac{G \cdot L_a \cdot \cos\alpha - R_{2y} \cdot L_b \cdot \cos\alpha}{L_b \cdot \sin\alpha} \quad (5.5)$$

Pro různé hodnoty  $\alpha$  bude i  $R_{2x}$  nabývat různých hodnot. Pro znázornění budou hodnoty uvedeny v následující tabulce Tab.9.

Krok:	1.	2.	3.	4.	5
Úhel natočení:	0°	0.8°	2.9°	10.2°	14.3°
Zatěžující síla $R_{2x}$ [N]	0	743.4	204.9	57.6	40.7

Tab. 9 Tabulka hodnot se zatěžují silou v krocích

Pro kontrolu bylo vypočteno ohybové napětí v poloze  $\alpha=0$ . Pro zjednodušení jsou na následujícím obrázku (Obr.61) vyznačeny potřebné hodnoty k výpočtu napětí. Výpočet bude proveden v oblasti řezu, tudíž 45mm od středu nosníku.



Obr. 61 Výpočetní rozměry nosníku

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{R_N \cdot \left( \frac{L_N}{2} - 45 \right)}{\frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{6 \cdot H}} = \frac{4002,5 \cdot \left( \frac{980}{2} - 45 \right)}{\frac{80 \cdot 80^3 - 70 \cdot 70^3}{6 \cdot 80}} = \frac{1961225}{35312,5} = 50,4 \text{ MPa} \quad (5.6)$$

Kde:

$L_N$ ... je délka nosníku [m]

$R_N$ ... je reakce nosníku při zatěžování [N]

$B$ ... je šířka nosníku [m]

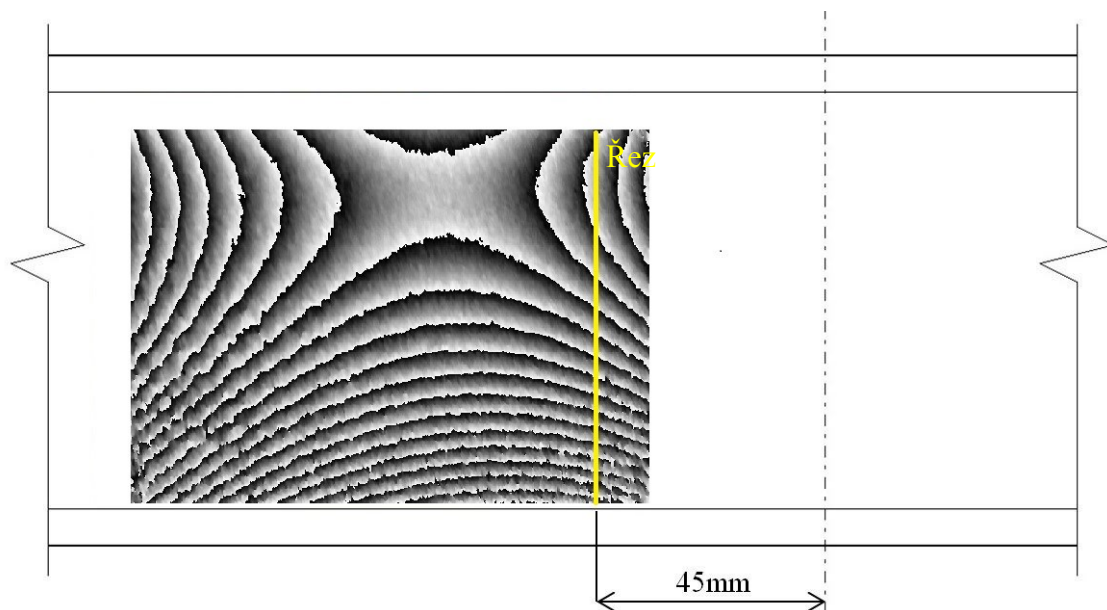
$H$ ... je výška nosníku [m]

$b, h$ ... jsou vnitřní rozměry (výška a délka) nosníku [m]

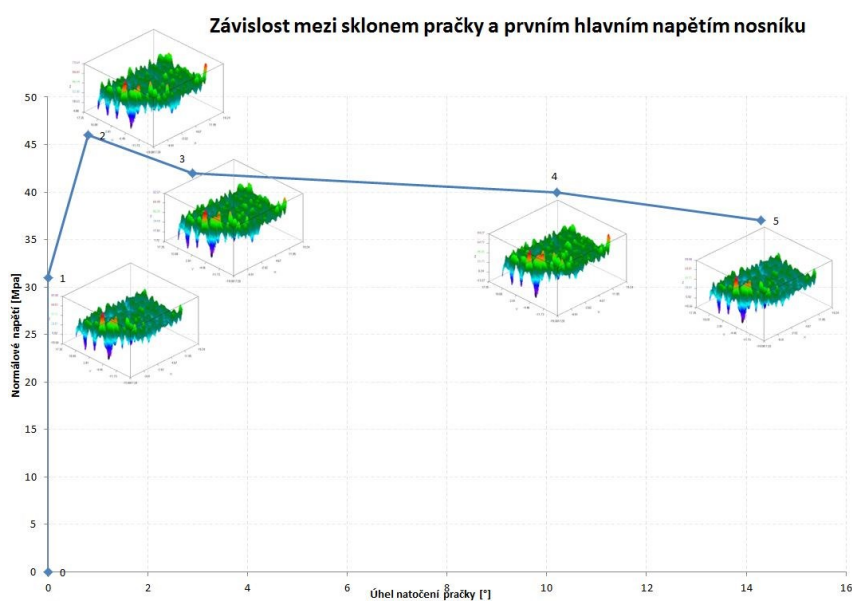
### 5.2.5. Vyhodnocení analýzy

Vzhledem k typu úlohy, jež demonstrovala tři bodový ohyb, důležitým faktorem pro správné vyhodnocení bude normálové napětí, doplněné o poměrnou deformaci v podélném směru „x“ a redukované napětí dle HMM hypotézy (Von Mises).

Následuje názorné zobrazení oblasti řezu pro vykreslení grafu hodnot daných veličin. Dle obrázku je nulový bod snímací hlavy situován 55mm od středu nosníku, řez je tedy situován přibližně kolem místa 45mm od středu nosníku.

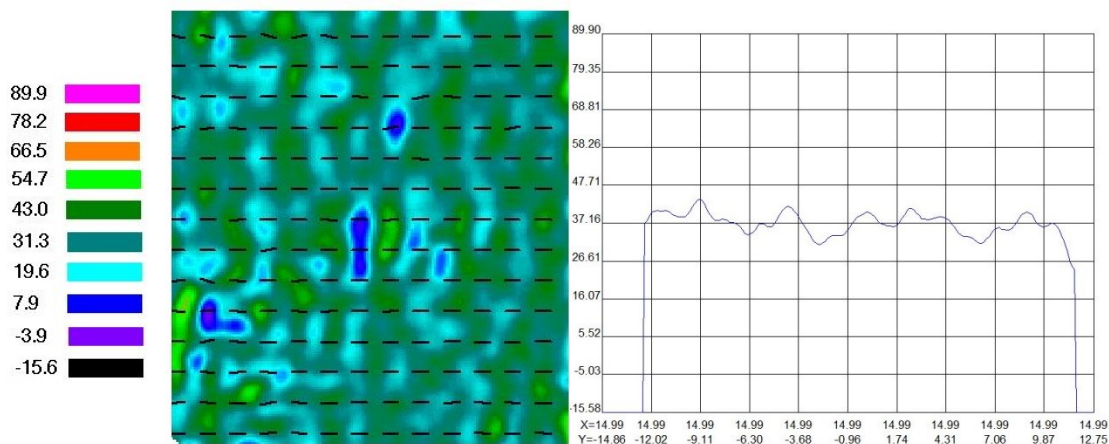


Obr. 62 Interferenční pruhy vyhodnocovací oblasti s polohou řezu výsledných hodnot

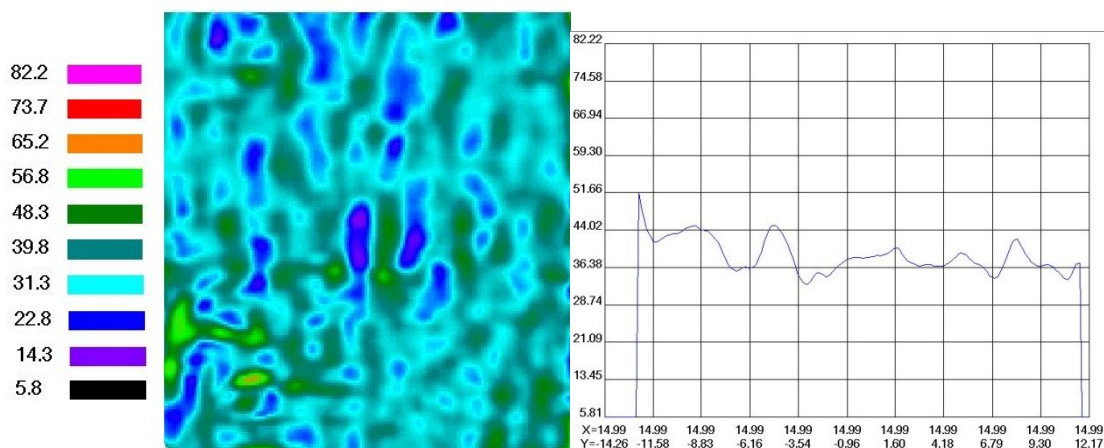


Obr. 63 Průběh prvního hlavního napětí závislého na sklonu natočení pračky

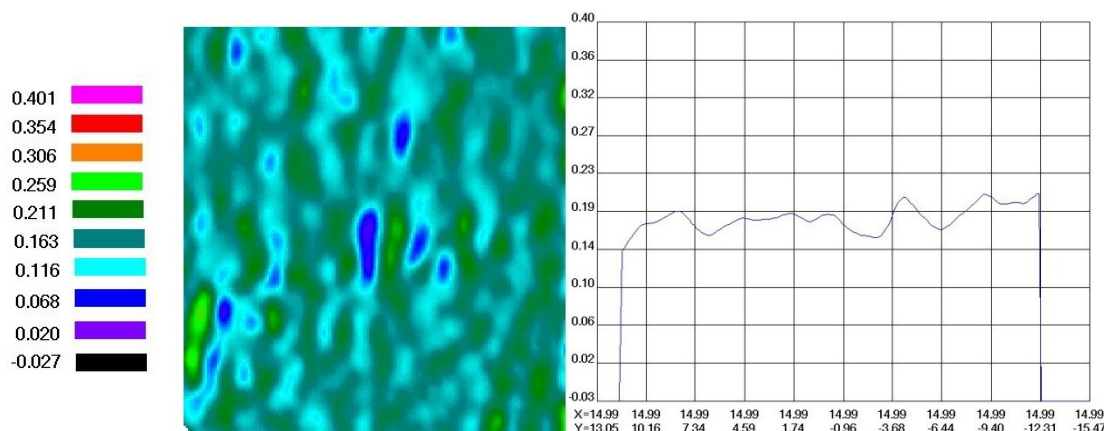
Obrázek (Obr.63) zobrazuje průběh prvního hlavního napětí v závislosti na sklonu pračky. Z grafu je patrné, že při limitně nulové hodnotě natočení, je nárůst napětí rapidní, který při dalších krocích klesá. Hodnoty napětí v grafu jsou průměrné hodnoty každého kroku z příčného řezu, označeného na Obr.62.



Obr. 64 První hlavní napětí



Obr. 65 Redukované napětí dle HMM hypotézy



Obr. 66 Poměrné deformace v podélném směru

Z důvodu negativních šumů se v legendě a konturách, viditelné na obrázcích (Obr. 64,65,66), vyskytují hodnoty, které jsou pro vyhodnocení výsledných hodnot zcela zanedbatelné.

Jak hodnoty normálového, tak i redukovaného napětí se ve vyšetřovaném místě pohybují kolem 40MPa. Podpůrný nosník může být označen tedy jako vyhovující. S porovnáním s mezí kluzu pro konstrukční ocel 11 353 Re= 180MPa[7] značně převyšuje tuto hodnotu, a to s 4,5 násobnou bezpečností.

## 6. Závěr

Diplomová práce se zabývala optickou metodou „Electronic speckle pattern interferometry“ (ESPI) a její aplikaci v praxi. Nedílnou součástí práce bylo důkladné seznámení s touto metodou na vybraných jednoduchých technických úlohách. Zkouškám byly podrobeny dva základní typy úloh a to úloha s tahovým namáháním a čtyř-bodovým ohybovým namáháním. Oba typy úloh byly také podrobeny pevnostní a deformační analýze metodou konečných prvků (MKP) pro ověření správnosti výsledných hodnot (viz kapitoly 4.1.2 a 4.2.2).

Mezi přední výhody zmíněné metody patří schopnost provádění a vyhodnocení analýz přímo na pracovišti za plného chodu testovaných součástí. Jelikož se jedná o nedestruktivní zkoušku, není zapotřebí dalších mechanických či jiných úprav testovaného objektu. Metoda je velmi vhodná pro měření členitějších, nebo tvarově náročnějších oblastí, které jsou u odlišných metod zcela nevyhovující.

Mezi nevýhody metody ESPI (u přístroje Q-100) se řadí například schopnost provádět pouze statické analýzy, což značnou mírou omezuje pole působnosti. Dále je velmi náchylná na vnější vlivy, například okolní vibrace, či nedostatečné osvětlení měřeného objektu. Tyto vlivy nepříznivě ovlivňují přesnost měření.

Nové poznatky o metodě ESPI byly dále aplikovány při měření u dvou technických zařízení.

První z nich byla testovací stolice simulující chod železničního kola po kolejnici (zkušební stroj TOURS), kde bylo analýze podrobeno rameno sloužící k vyvození přítláčné síly.

Druhým zařízením byla průmyslová pračka Primus FS40, u níž byl analýze podroben podpůrný zvedací příčný nosník.

V prvním případě se hodnoty jak redukovaného napětí  $\sigma_{RED}$  [MPa] (dle HMM hypotézy), tak i tangenciálního napětí  $\sigma_t$  [MPa] pohybovaly v oblasti kolem hodnoty 70MPa, což byly výrazně nižší hodnoty. Zjištěna byla 6-ti násobná bezpečnost vůči mezi kluzu materiálu 11 523 (Re=333MPa).

V druhém případě u podpůrného nosníku se hodnoty prvního hlavního napětí  $\sigma_1$  [MPa] a redukovaného napětí  $\sigma_{RED}$  [MPa] (dle HMM hypotézy) pohybovaly taktéž



v kritickém místě okolo 40MPa, což byly opět výrazně nižší hodnoty než mez kluzu. Zjištěna byla 4.5 násobná bezpečnost vůči mezi kluzu materiálu 11 353 ( $R_e=180\text{Mpa}$ ).

Vzhledem k znatelnějšímu rozdílu výsledných hodnot napětí, přibližně o 10MPa se naskytuje řada podnětů, kde nastala chyba. Jednou z možných chyb můžou být nepříznivé okolní vlivy, nebo také nesprávné počáteční hodnoty použité při analytickém výpočtu napětí. Jelikož snímací kamera systému Q-100 je velmi náchylná na nepříznivé vlivy okolí, je velkou pravděpodobností, že tuto chybu zapříčinily právě tyto okolní vlivy.

## **7. Poděkování**

Tímto děkuji převážně vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radimovi Halamovi, Ph.D. za výborné vedení při tvorbě diplomové práce a za spoustu cenných rad a také Ing. Lubošovi Pečenkovi za cenné rady při tvorbě diplomové práce. Dále panu Petru Matějkovi za zprostředkování technického měření ve firmě Primus CE s.r.o. V neposlední řadě také všem, kteří byť sebemenším poznatkem přispěli k vypracování této diplomové práce.

## 8. Seznam použité literatury

- [1] TREBUŇA F., ŠIMČÁK F. Příručka experimentální mechaniky. Edice vědecké a odborné literatury, 1528 stran, Technická univerzita v Košicích, 2008.
- [2] ANSYS Academic Teaching Advanced, Release 14.0, Help System ANSYS, INC.
- [3] Dokumentace k přístroji Dantec Dynamics Q100, Dantec Dynamics a Nova Instruments company, 2012. [<http://www.dantecdynamics.com/>]
- [4] Dokumentace k přístroji Testometric M500-50CT, LABOR machine, s.r.o. 2008. [<http://www.labor-labor.cz/>]
- [5] Guidelines for the Calibration & Evaluation of Optical Systems for Strain Measurement, 2010 University of Sheffield 72 p. Dostupné elektronicky [<http://www.opticalstrain.org/>]
- [6] Dokumentace, technické údaje k přístroji Primus FS40, Primus CE Czech Republic, Dostupné elektronicky [<http://www.primuslaundry.com/cz/>]
- [7] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 3. doplněné vydání, 2006, 914s, ISBN 80-7361-033-7
- [8] DOYLE James; *Modern experimental stress analysis: completing the solution of partially specified problems*. © 2004 John Wiley & Sons, Ltd, 435s ISBN 0-470-86156-8